

Treball de Fi de Grau

GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS

FOILS EN VELA LLEUGERA

MEMÒRIA

Autor: Adriana Rodés Puig
Director: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Abril 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUM

Els *hydrofoils* són unes ales dissenyades per aixecar el casc d'un vaixell en moviment de manera que la major part d'aquest estigui per sobre de l'aigua. D'aquesta manera la fricció amb l'aigua es redueix notablement i s'aconsegueixen velocitats molt més elevades.

El treball "Foils en vela lleugera" és un projecte de disseny d'*hydrofoils* per una modalitat de vela lleugera olímpica que rep el nom de Nacra 17. Aquesta disciplina és un catamarà en el que naveguen dues persones i se'n va començar a parlar fa només 5 anys. Les olimpíades de Rio 2016 van ser les primeres en les que el Nacra 17 participava com a classe olímpica. Des del naixement del Nacra (a l'any 2012) fins aquell moment, el seu disseny no es podia modificar, és a dir, estava bloquejat per l'ISAF (International Sailing Federation). Durant aquests quatre anys de proves i regates internacionals, molts dissenyadors de vaixells van observar una sèrie d'aspectes que es podien millorar i que facilitarien la navegació amb el Nacra. En aquest treball s'estudia teòricament i experimentalment la possibilitat d'incloure *hydrofoils* al Nacra 17.

L'estructura del treball està dividida en dos parts, la primera es centra en la recerca i estudi que s'ha dut a terme sobre la teoria que envolta el món dels *hydrofoils* i la segona tracta sobre l'anàlisi per simulació que s'ha fet a partir d'aquests coneixements.

La part de la simulació es realitzarà mitjançant el software ANSYS Fluent 17.0. En aquesta part s'analitzarà en 2-D el comportament dels *hydrofoils* en termes d'estabilitat, sustentació, resistència a l'avanç per tal de provar la seva eficiència hidrodinàmica.

Finalment es presentarà un pressupost que caldria per finançar aquest projecte i quin impacte mediambiental tindria.



SUMARI	
RESUM	1
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	6
2.1 ORIGEN DEL PROJECTE I MOTIVACIÓ	6
2.2 REQUERIMENTS PREVIS	6
3. INTRODUCCIÓ	8
3.1 OBJECTIUS	8
3.2 ABAST DEL PROJECTE	8
4. PERFILS HIDRODINÀMICS	9
4.1 INTRODUCCIÓ ALS FOILS	9
4.1.1 Què és un foil i quin és el seu origen	9
4.1.2 Quin tipus d'embarcacions de vela lleugera pot portar foils?	12
4.2 DESCRIPCIÓ GENERAL DEL NACRA 17	13
4.3 GEOMETRIA I PARÀMETRES D'UN PERFIL	15
4.4 PRINCIPIS I FENÒMENS DE LA DINÀMICA DE FLUIDS	16
4.4.1 Forces de sustentació o Lift (L)	18
4.4.2 Forces de resistència a l'avanç o Drag (D)	19
4.4.3 Moments de capcineig	20
4.4.4 Entrada en pèrdua	21
4.4.5 Cavitació	22
4.5 SELECCIÓ DEL PERFIL	23
4.5.1 Criteris de selecció	24
4.5.2 Anàlisi dels possibles perfils	26
4.5.3 Comparativa dels perfils	41
4.5.4 Decisió final	45
5. SIMULACIÓ	48
5.1 ANÀLISI I INTERPRETACIÓ DE LES SOLUCIONS 2D	50
5.1.1 Línies de corrent	50
5.1.2 Velocitats	51
5.1.3 Pressions	54

5.1.4 Cavitació	55
6. PRESSUPOST I PLANIFICACIÓ	57
6.1 COSTOS DE PERSONAL	57
6.2 COSTOS DE SERVEIS	58
6.3 COSTOS DE MATERIAL D'OFICINA	58
6.4 PLANIFICACIÓ	59
7. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	61

1. GLOSSARI

<u>SIGLES/SÍMBOL</u>	<u>SIGNIFICAT</u>	<u>UNITATS</u>
2-D	Dues dimensions	
α	Angle d'atac	$^{\circ}$
ρ	Densitat	kg/m ³
v	Velocitat relativa entre el fluid i la superfície	m/s
g	Gravetat	m/s ²
h	Alçada d'un punt en la direcció de la gravetat	m
P	Pressió en un punt	Pa
F_L	Força de sustentació (Lift)	N
C_L	Coeficient de sustentació	---
A_L	Àrea del perfil	m ²
F_D	Força de resistència a l'avanç (Drag)	N
C_D	Coeficient de resistència a l'avanç	---
A_P	Àrea del perfil en planta	m ²
M	Moment de capcineig	N·m
C_M	Coeficient de capcineig	---
c	Corda	m
μ	Viscositat dinàmica del fluid	Pa·s
ν	Viscositat cinemàtica del fluid	m ² /s
Re	Número de Reynolds	---

2. PREFACI

2.1 ORIGEN DEL PROJECTE I MOTIVACIÓ

La meva motivació per a la realització d'aquest treball és la meva passió pel mar. Des de ben petita he practicat tot tipus d'esports en aquest medi fins que vaig començar la meva carrera com a esportista d'èlit en vaixells de vela lleugera des dels 13 anys fins als 18. Quan van començar els meus estudis a l'escola d'Enginyeria Industrial vaig decidir aplaçar les competicions. Tot i així, aquests anys he seguit molt vinculada al món de la vela i m'he mantingut al dia sobre les novetats en quant a dissenys de vaixells nous. Gràcies a això he pogut fer aquest treball amb coneixements de les meves pròpies experiències, d'assignatures com Mecànica de Fluids i amb informació de la mà de dissenyadors de vaixells coneguts mundialment.

Cal esmentar que vaig tenir la sort de poder realitzar l'optativa de construir un vaixell teledirigit (RC Sailing). Aquesta experiència va ser la primera en la que vaig poder utilitzar tant els meus coneixements pràctics d'aspectes de la navegació, com els assolits durant el Grau en Enginyeria de Tecnologies Industrials a la vegada. Un cop acabada aquesta optativa em vaig quedar amb ganes de tornar barrejar la teoria i la pràctica, ja que considero que és una manera excel·lent d'aprendre profundament d'una cosa tan important com ho és la vela per mi.

Així doncs, l'aparició del Nacra 17 com un disseny tan nou i exòtic però amb coses encara per acabar de polir se'm va presentar com una oportunitat perfecte per fer-hi un estudi i presentar-lo com a Treball de Final de Grau.

2.2 REQUERIMENTS PREVIS

Gràcies als coneixements teòrics de Mecànica de Fluids i l'optativa RC Sailing adquirits al llarg de la carrera, ha sigut possible encarar aquest projecte.



L'adquisició de conceptes com sustentació, resistència a l'avanç, entrada en pèrdua, capa límit, distribució de pressions, cavitació y més, m'han permès poder aprofundir en l'estudi hidrodinàmic dels *hydrofoils*.

En quant al software utilitzat en aquest treball, el Fluent d'Ansys, el coneixia gràcies a les pràctiques de Mecànica de Fluids, de totes maneres familiaritzar-se amb el programa i aconseguir les gràfiques pertinents ha suposat tot un repte per mi.

3. INTRODUCCIÓ

3.1 OBJECTIUS

Amb la realització d'aquest treball es pretenen assolir objectius relacionats amb l'assignatura de Mecànica de Fluids per una banda i amb tots els aspectes físics que hi ha darrere dels *hydrofoils* per l'altra banda. Així doncs es podrien resumir de la següent manera:

- Conèixer com funciona un *hydrofoil* i quina és la seva evolució fins a l'actualitat.
- Entendre els raonaments teòrics i físics sobre els que se sustenta el disseny de foils de qualsevol mena.
- Trobar un perfil que cobreixi els requeriments del Nacra 17.
- Realitzar un estudi de simulació amb el perfil escollit.
- Saber quin seria el cost econòmic i ambiental si la idea es portés a la realitat.

3.2 ABAST DEL PROJECTE

D'entrada en aquest projecte s'introdueix què són els *hydrofoils* i quins fonaments teòrics hi ha al darrere.

A continuació es busca quin és el perfil que més encaixa amb el Nacra 17 mirant quines són les necessitats que cal cobrir per tal de garantir una navegació segura i divertida.

Tot seguit, un cop decidit quin perfil es tria, se simula amb el software adient, en aquest cas, Fluent 17.0 i s'analitza si el perfil triat compleix o no les especificacions requerides.

Per últim es toca la part econòmica i ambiental del projecte. Es fa un estudi de quin seria el cost de dissenyar un *hydrofoil* per a una classe olímpica i quin seria el seu impacte mediambiental.

4. PERFILS HIDRODINÀMICS

4.1 INTRODUCCIÓ ALS FOILS

4.1.1 Què és un foil i quin és el seu origen

Foil és simplement un sinònim de la paraula ala, com per exemple l'ala d'un avió. Un *hydrofoil* és una ala que “vola” per l'aigua.

Els *hydrofoils* permeten que un vaixell vagi més ràpid degut a que el casc navega per fora de l'aigua. Quan un vaixell normal es mou cap endavant, la major part de l'energia es gasta en fer fora del camí l'aigua que hi ha a la proa del vaixell. Els *hydrofoils* aixequen el casc per tant, tota aquesta energia es redueix a la fricció que aporten les làmines en lloc de la totalitat de la fricció del casc.

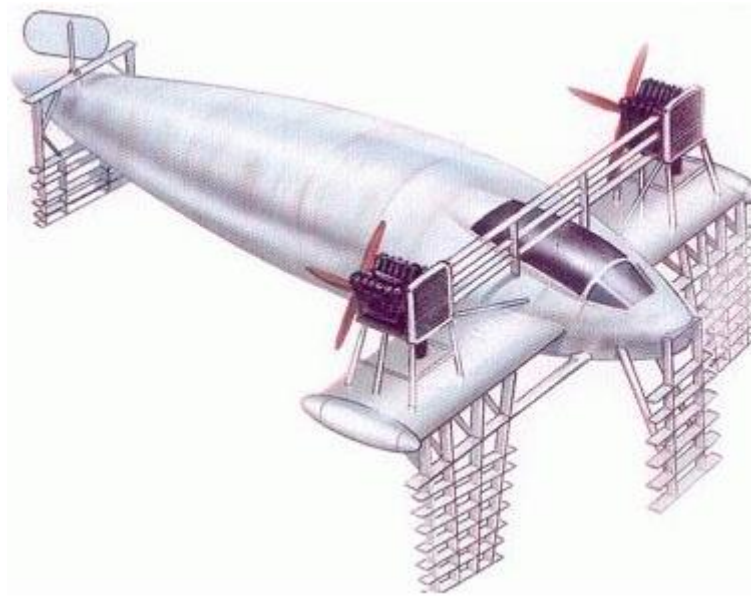
Una hidroala és molt menor que una ala d'un avió. Això és perquè l'aigua és d'aproximadament 1000 vegades més densa que l'aire. També influeix el factor de que un vaixell no cal que es mogui ni de lluny tan ràpid com un avió abans de que es generi la sustentació suficient per empènyer-la a “volar”.

Els *hydrofoils* funcionen correctament només quan estan a l'aigua; si surten de l'aigua perquè s'eleva massa el vaixell, aquest caurà cap a la superfície de l'aigua i per tant es tornaran a submergir els foils fins que generin suficient elevació per aixecar de nou l'embarcació cap a fora. És important doncs mantenir sempre els *hydrofoils* a una profunditat determinada de l'aigua.

L'origen dels *hydrofoils* es remonta a finals del segle XIX. El projecte va ser suggerit l'any 1869 per un enginyer francès, Joseph Farcot, convençut que una embarcació podia avançar més ràpidament per sobre de l'aigua en comptes de immersa en ella si estava sostinguda per flotadors o per esquís amb superfícies de suport més baixes que el propi casc, reduint notablement d'aquesta manera la resistència a l'avanç.



L'any 1903 es va realitzar el primer experiment amb un hidrovolador amb molt d'èxit. L'inventor italià Enrico Forlanini va patentar aleshores les seves idees i invents a la Gran Bretanya i als Estats Units. Al 1909 ja s'havien registrat velocitats de 35 nusos (65 km/h).



[Figura 4.1] Hydrofoils en forma d'escala, un dels primers dissenys.

Alexander Graham Bell va començar a interessar-se pel projecte i evolucionant els descobriments de Forlanini va aconseguir un prototip que arribava a velocitats de 88 Km/h, amb una ràpida acceleració, superant onades sense dificultats i amb molt bona governabilitat i estabilitat.

L'informe de Bell a la Marina dels Estats Units li va permetre obtenir motors més potents de manera que al 1919 es va establir un rècord mundial de velocitat sobre l'aigua aconseguint els 114 km / h , rècord que va romandre vigent durant deu anys.



[Figura 4.2] Una de les primeres llanxes esportives amb *hydrofoils*.

Després de la segona guerra mundial, l'any 1952 va aparèixer el primer hidroala comercial, el PT10, en el Llac Maggiore, entre Suïssa i Itàlia. El PT10 era capaç de transportar 32 passatgers a una velocitat de 35 nusos.

La Unió Soviètica també va començar a experimentar extensivament amb hidroales, construint models per a la navegació fluvial i ferris amb dissenys estilitzats, especialment durant les dècades de 1970 i 1980.

Si s'entra en el món de la vela lleugera es descobririx que companyies tan importants com Hobie Cat o WindRider van presentar models amb foils en la dècada dels 90, però l'aposta no es va traduir en cap revolució en el mercat.

Per altra banda, més èxit estan tenint en els últims anys unes embarcacions de tot just 3,5 metres d'eslora i uns 20 quilograms de pes: els vertiginosos Moth. Es tracta d'una embarcació lleugera capaç d'aixecar el seu casc de fibra de carboni o de vidre, gràcies a una hidroala. Cada unitat costa uns 12.000 euros.



[Figura 4.3] Un moth navegant per sobre l'aigua.

Molta expectació ha aixecat també el pack de hidroales que ja estan començant a vendre's a Austràlia per a vela lleugera, en concret per a la classe Laser, un dels vaixells més populars del món. El petit monocasc pot volar amb tan sols canviar el timó i l'orsa convencionals per ales. També el surf, el windsurf o l'esquí aquàtic han tingut les seves versions de *hydrofoil*.

4.1.2 Quin tipus d'embarcacions de vela lleugera pot portar foils?

Com és fàcil de suposar, no totes les embarcacions poden portar foils i aixecar-se per sobre de l'aigua. Un dels requisits més imprescindibles és la velocitat. Si un vaixell té una arrancada molt lenta o es troba molt limitat en quant a la velocitat punta a la qual pot arribar, difícilment aconseguirà despegar i navegar per sobre les onades amb estabilitat. També és evident que el pes total del vaixell més el dels tripulants ha de ser més aviat petit en relació a la seva eslora. Cal tenir en compte també l'estabilitat que ofereix la navegació de la barca en qüestió, és a dir, sempre serà més senzill dissenyar uns *hydrofoils* per a una classe estable i a la vegada serà més senzill pel patró governar el vaixell sense problemes. Per tant l'estudi se centra en embarcacions ràpides, lleugeres i estables.

Degut a què el món de la vela lleugera és tan ampli, molts iots encaixen en la descripció proposada; des del làser, un monocasc el disseny del qual té gairebé 50 anys, passant pel Moth, de només 20 kgs de pes fins al catamarà de vela lleugera més famós de tots, el HobbieCat.

De totes maneres els catamarans o trimarans sempre van un pas per endavant en quant a *hydrofoils*. El fet de tenir més d'un casc significa més estabilitat i a l'hora més llocs on poder posar ales que aixequin i controlin el vol del vaixell. És per aquest motiu que aquest treball estudiarà i analitzarà un catamarà molt especial i a més a més debutant olímpic en les darreres olimpíades a Rio, el Nacra 17.



[Figura 4.4] Un Nacra 17 saltant les onades.

4.2 DESCRIPCIÓ GENERAL DEL NACRA 17

El Nacra 17 és un monotip catamarà que va ser dissenyat l'any 2011 i produït per primera vegada el 2012. Al maig de 2012 la Federació Internacional de Vela va triar el Nacra 17 per establir una nova categoria olímpica, per primer cop mixta dona-home, a partir dels Jocs Olímpics de Rio de Janeiro 2016.

Només cal veure'l en directe un parell de minuts per comprovar que el Nacra 17 és tan ràpid com difícil de governar. Fernando Echávarri, tota una eminència en multicascos i actual entrenador de la parella de regatistes que va representar a Espanya en el últims jocs, defineix de manera senzilla el vaixell: "Pel petit que és (una mica més de 5 metres d'eslora), corre moltíssim; sembla una joguina, però es tracta d'un disseny més evolucionat que el del Tornado, l'anterior multicasc olímpic ". Segons la seva opinió, el Nacra 17 és molt semblant als actuals vaixells de Copa Amèrica.

El Nacra presenta unes orses corbades les quals permeten una major escorada i a l'hora una tripulació amb un marge més ampli de pesos, aspecte molt important a l'hora de afegir una nova disciplina olímpica, ja que així queda més oberta a un rang de fisionomies més gran.

Per Echávarri, la incorporació d'aquest tipus d'orsa ajuda a que el vaixell surti una mica de l'aigua i redueix la fricció dels cascocs amb la superfície, el que fa que el vaixell vagi més ràpid que si portés les orses tradicionals ".

Respecte a com governar aquesta petita bèstia, el Nacra 17 és una classe molt més tècnica, és a dir, cal una suma d'hores alta per arribar a tenir un control del barco absolut.

El que encara és una realitat avui dia és que aquest catamarà presenta encara moltes incògnites i pot evolucionar molt en els propers anys. Aquí és on entra el meu treball, com reaccionaria el nacra amb *hydrofoils*?

TRIPULANTS	2, un patró i un tripulant
ESLORA	525 cm
AMPLITUD	259 cm
PES DEL VAIXELL SENSE TRIPULANTS	141 kg

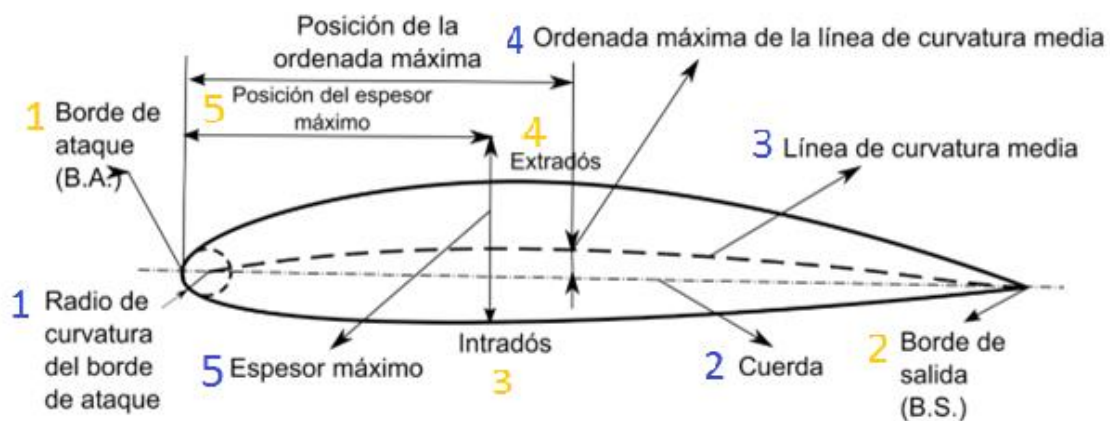


VELES	Major: 14,62 m ² , floc: 4 m ² , spinnaker: 19,5 m ²
ANY DE DISSENY	2011
DISSENYADOR	Morrelli & Melvin
INICI ALS JJOO	2016 a Rio de Janeiro

[Figura 4.5] Taula de característiques del Nacra 17.

4.3 GEOMETRIA I PARÀMETRES D'UN PERFIL

Per a dissenyar un sistema d'*hydrofoils* per a una embarcació és molt important fer un bon estudi del tipus de perfil que es necessitarà. Qualsevol perfil alar té uns paràmetres modificables depenent de les especificacions requerides. A continuació es mostra un esquema on apareixen representats aquests paràmetres i la geometria que podria adquirir fàcilment tant una ala d'avió com un *hydrofoil*.



[Figura 4.6] Esquema de les diferents parts i regions d'un foil.

D'un perfil alar podem diferenciar fins a 6 parts o regions, que serien les següents:

- 1. Vora d'atac (leading edge):** És la part davantera del perfil alar, és la primera part que pren contacte amb el fluid, provocant que aquesta es bifurqui cap a l'intradós i l'extradós.

2. Vora de sortida (trailing edge): Anomenat també "vora de fuga". Correspon al punt en què els corrents d'aire provinents de l'intradós i extradós conflueixen i abandonen el perfil. Encara que en la majoria dels gràfics es traci de forma aguda, no sempre és així.
3. Intradós (lower surface): Terme genèric que denota la part inferior de l'estructura.
4. Extradós (upper surface): Terme genèric que denota la part superior de l'estructura.
5. Posició de gruix màxim: on la distància entre l'abscissa del punt d'inici de la vora d'atac i l'abscissa de la curvatura és màxima.

Els **paràmetres** d'un perfil tenen un gran impacte en les seves característiques aerodinàmiques. Aquests es poden llistar com segueix:

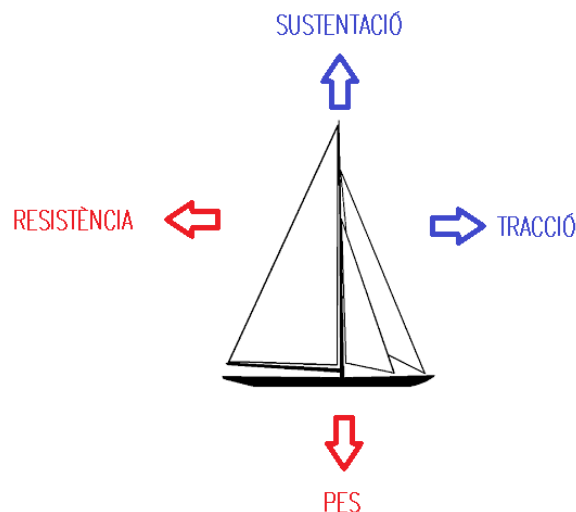
1. Ràdi de la vora de atac: Defineix la forma de la vora d'atac. És un terme que influeix de forma important en la pèrdua. Geomètricament és un cercle que és tangent tant a l'intradós com a extradós. La seva longitud es mesura en tant per cent del valor de la corda.
2. Corda: Correspon a la línia recta que uneix la vora d'atac i la vora de sortida. El seu valor és una característica particular de qualsevol perfil.
3. Línia de curvatura mitjana: És una línia equidistant entre l'extradós i l'intradós. Defineix la curvatura del perfil de la següent manera: si aquesta cau per sobre de la corda com en la figura, es diu que el perfil posseeix curvatura positiva. Si aquesta cau per sota de la corda, es diu que el perfil posseeix curvatura negativa. Si aquesta cau per sobre i també per sota de la corda, es diu que el perfil posseeix una doble curvatura.
4. Curvatura màxima: Correspon a la distància màxima entre la línia de curvatura mitjana i la corda. El valor de la seva ordenada i la posició d'aquesta ordenada s'expressa en general en% de la longitud de la corda.
5. Gruix: Correspon a la distància màxima que hi pot haver entre l'intradós i l'extradós.



4.4 PRINCIPIS I FENÒMENS DE LA DINÀMICA DE FLUIDS

Sobre un vaixell en moviment actuen una sèrie de forces, algunes favorables i algunes altres desfavorables. De totes les que hi actuen les bàsiques i principals perquè afecten a totes les maniobres són quatre: la sustentació, el pes, l'empenta i la resistència. Aquestes quatre forces actuen en parells; la sustentació és oposada al pes, i l'empenta o tracció a la resistència.

Cal tenir en compte que en aquest treball s'estudia l'equilibri de les forces en un règim permanent, és a dir, sense la presència d'acceleració. De manera que una embarcació es manté aturada a causa de l'acció de dues forces: el seu pes i la inèrcia o resistència a l'avanç que el manté aturat. Perquè aquesta embarcació en un moment donat s'enlairi caldrà contrarestar l'efecte d'aquestes dues forces negatives mitjançant altres dues forces positives de sentit contrari, sustentació i empenta respectivament. Així, l'empenta ha de superar la resistència que oposa el vaixell quan avança, i la sustentació superar el pes del mateix mantenint-lo en l'aire.



[Figura 4.7] Forces que apareixen tant en un avió en vol com en un vaixell en moviment.

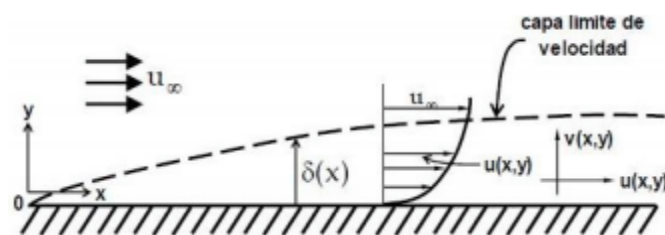
En general, per a valors del nombre de Reynolds prou alts, es pot considerar que la viscositat és zero i el flux extern és ideal. Considerant també flux estacionari i incompressible es pot aplicar l'equació de Bernoulli

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2$$

[Equació 4.1]

No obstant, en la regió de contacte entre el fluid i el cos que l'atreveixa, es troba una zona en que les forces viscoses són molt més importants degut al contacte amb la superfície. Aquesta regió s'anomena capa límit.

Per tant, es pot separar el flux en dues regions que es comporten diferent: la no viscosa (flux extern) i la viscosa (capa límit). La força de resistència a l'avanç es veurà molt afectada pel comportament del flux en la regió viscosa.



[Figura 4.8] Dibuix de la capa límit en una superfície.

4.4.1 Forces de sustentació o Lift (L)

És una força ocasionada pel fluid en direcció perpendicular a la direcció del moviment del cos. La seva fórmula és la següent:

$$F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 C_L A_L$$

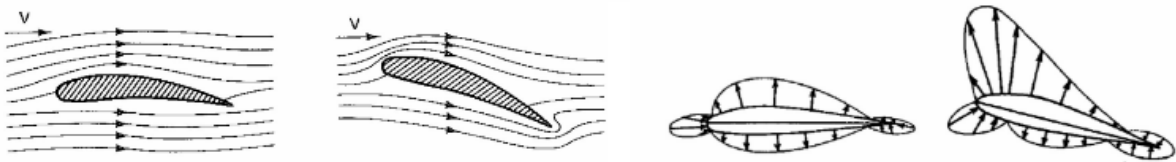
[Equació 4.2]

On C_L és el coeficient de sustentació.

Aquest fenomen succeeix degut al fet que el perfil de l'ala no és simètric, és a dir que la longitud de l'extradós és més gran que la de l'intradós. Dos partícules entren per el caire d'atac, una es desvia per la línia de corrent més pròxima a l'extradós i l'altre per la línia més propera a l'intradós. Si estudiem un volum de control d'estudi finit, el flux que entra travessant el perfil alar és el mateix que surt del volum de control. Per tant la partícula que recorre l'extradós i la de l'intradós han d'arribar al caire de sortida al mateix temps. De manera que cal que una

partícula circuli més ràpid que l'altre. Aquesta diferència de velocitats genera un gradient de pressions. Apareixen zones de pressions negatives a l'extradós que generen un succionament de la superfície i per tant augmenta la sustentació. Per l'altre banda, a l'intradós es generen pressions positives que també favoreixen la força de sustentació.

La sustentació, i en conseqüència, el seu coeficient, depenen directament de l'angle d'atac, creix segons aquest augmenta fins a arribar a un punt màxim, després del qual, el flux d'aire que passa sobre l'extradós (part superior de l'ala), no aconsegueix recórrer-la en la seva totalitat i mantenir-se adherit al perfil aerodinàmic, donant lloc a l'entrada en pèrdua.



[Figura 4.9] Trajectòria de les partícules i distribució de pressions al voltant del perfil.

4.4.2 Forces de resistència a l'avanç o Drag (D)

En dinàmica de fluids, l'arrossegament és la fricció entre un objecte sòlid i el fluid (un líquid o gas) pel qual es mou. Per a un sòlid que es mou per un fluid o gas, l'arrossegament és la suma de totes les forces aerodinàmiques o hidrodinàmiques en la direcció del flux del fluid extern. La força ha de contrarestar per mitjà d'una força de propulsió en la direcció oposada per tal de mantenir o incrementar la velocitat del vehicle.

La força de resistència a l'avanç es pot escriure com segueix:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A_P$$

[Equació 4.3]

On C_D és el coeficient de Drag.

Tant la sustentació, com la força de resistència a l'avanç que incideixen sobre l'objecte, ja sigui un avió o una embarcació amb foils, només es poden pensar

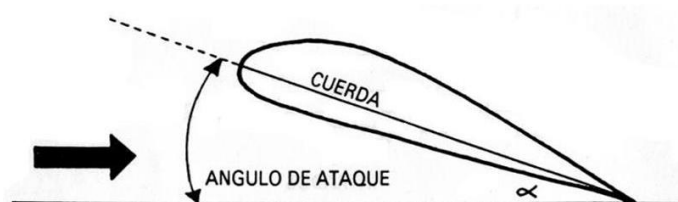
en presència d'un fluid, és a dir, de la massa d'aire o d'aigua amb la que entra en contacte el sòlid en qüestió. Cap d'elles té sentit en el buit.

4.4.3 Moments de capcineig

El capcineig és el moviment del vaixell consistent en una elevació i descens alternatius de la proa i de la popa, a causa de les onades.

En aquest cas l'estudi del capcineig té a veure amb el fet que els *hydrofoils* poden desestabilitzar fortament les embarcacions que n'utilitzen. El capcineig pot provocar que la proa es submergeixi en l'aigua provocant una desacceleració molt forta, posant en perill l'estructura del catamarà i la seguretat dels tripulants. A més a més els forts impactes que rep la proa degut al capcineig han de ser resistits per l'estructura del vaixell, i és força habitual que en el rumb de cenyida (navegació en contra del vent) que és quan el capcineig és més significatiu, després d'una forta onada peti el pal o quelcom de la superfície del barco.

El moment de capcineig és funció de l'angle d'atac excepte en un punt del perfil on aquest moment és independent de l'angle. Per trobar experimentalment aquest punt és necessari calcular el C_m per a un rang de valors de C_L i en diferents posicions de la corda del perfil. Amb aquest procediment es troba el punt on C_m és virtualment constant i independent del C_L i rep el nom de centre aerodinàmic. Es troba aproximadament entre el 23-25% de la longitud de corda a partir del caire d'atac



[Figura 4.10] Esquema de l'angle d'atac d'un perfil.

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_P c}$$

[Equació 4.4]

4.4.4 Entrada en pèrdua

L'entrada en pèrdua és un fenomen que consisteix en la disminució més o menys sobtada de la força de sustentació que genera el corrent incident sobre un perfil aerodinàmic. Es produeix generalment quan l'angle d'atac, el que forma la corda del perfil alar amb el fluid, arriba a un cert valor límit, que depèn en gran mesura de la velocitat de l'aire i del disseny del perfil.

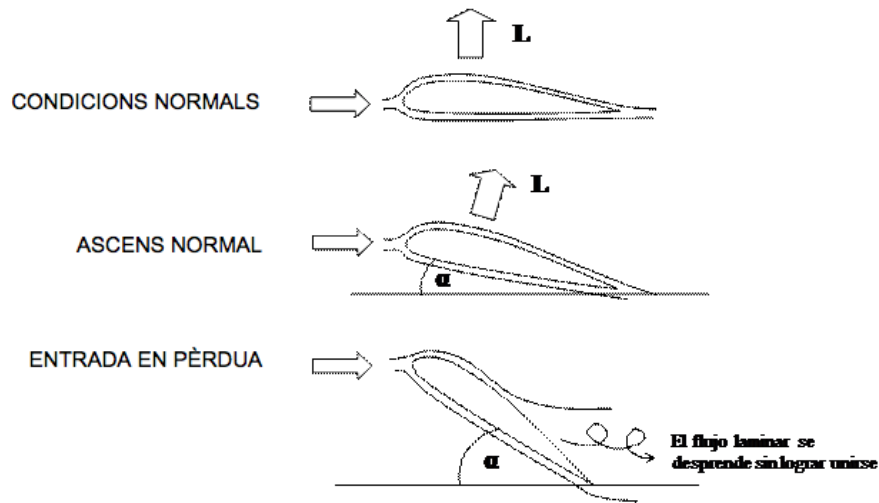
La reducció de la sustentació és deguda a la separació de la capa límit, en aquell moment s'inverteix la direcció relativa del flux d'aire en determinades zones de la superfície aerodinàmica, reduint d'aquesta manera la succió generada per l'aire. Quan aquest fenomen succeeix en una part significativa de la superfície, provoca una reducció notable de la capacitat de sustentació de l'ala, alhora que augmenta considerablement la resistència aerodinàmica.

Quan l'entrada en pèrdua succeeix en vol, el pilot ha de recuperar la sustentació i l'estabilitat fent que l'avió "piqui", és a dir, fent que el morro baixi respecte de la cua. Quan l'entrada en pèrdua succeeix amb un vaixell el que passa és que aquest deixa d'estar enlairat i cau ràpidament contra l'aigua. Si es parla d'un catamarà és molt factible que aquest fenomen li passi només a un dels dos flotadors de manera que acte seguit és molt probable que l'embarcació volqui.

Es poden distingir tres situacions en què es produeix la pèrdua:

- Pèrdua per baixa velocitat i gran angle d'atac α .
- Pèrdua accelerada per un increment sobtat o brusc de l'angle d'atac.
- Pèrdua per ona de xoc a alta velocitat.



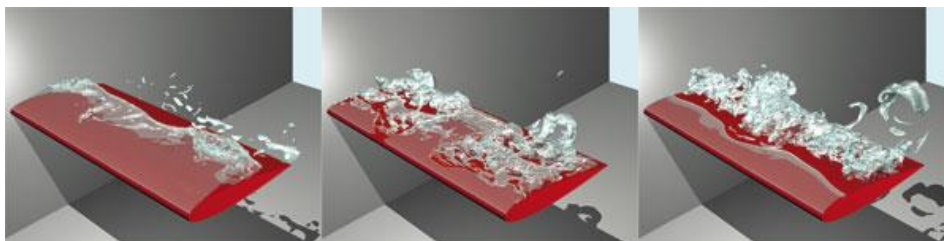


[Figura 4.11] Evolució de la posició del foil des de condicions normals fins a l'entrada en pèrdua.

4.4.5 Cavitació

Aquest és l'únic fenomen dels esmentats anteriorment que succeeix quan el fluid és l'aigua. La cavitació o aspiracions en buit és un efecte hidrodinàmic que es produeix quan l'aigua o qualsevol altre fluid en estat líquid passa a gran velocitat per una aresta afilada, produint una descompressió del fluid a causa de la conservació de la constant de Bernoulli. Pot passar que s'arribi a la pressió de vapor del líquid de tal manera que les molècules que el componen canvien immediatament a estat de vapor, formant-se bombolles. Quan aquestes bombolles deixen de trobar-se en les condicions termodinàmiques que les han produït, implosionen (el vapor torna a l'estat líquid de manera sobtada, «aixafant» bruscament les bombolles).

Si les bombolles de vapor es troben a prop o en contacte amb una paret sòlida quan canvien d'estat, les forces exercides pel líquid en aixafar-les donen lloc a pressions molt altes, ocasionant picades i irregularitats sobre la superfície sòlida. El fenomen generalment va acompanyat de soroll i vibracions, donant la impressió com si es tractés de grava que colpeja a diferents parts del vaixell.

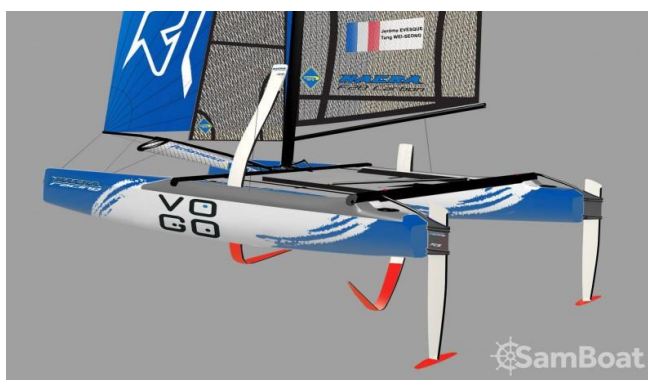


[Figura 4.12] Cavitació simulada sobre una perfil d'hydrofoil.

4.5 SELECCIÓ DEL PERFIL

A l'hora d'escollir un perfil per a un *hydrofoil* és molt important tenir clar el seu objectiu, que és ser capaç d'aixecar l'embarcació per sobre de l'aigua i que un cop enlairada aquesta tingui estabilitat.

Com ja s'ha esmentat anteriorment el Nacra és un vaixell molt jove el disseny del qual encara es troba en constant desenvolupament. Varies empreses pioneres en dissenys de cascs de vela lleugera es dediquen a pensar en com millorar el model que actualment és el vàlid. Algunes d'aquestes idees són acceptades pel comitè internacional que porta la classe Nacra 17. Actualment l'últim disseny del què es parla inclou unes orces molt angulades i uns *hydrofoils* a les pales del timó.



[Figura 4.13] Disseny olímpic amb orces curvades. [Figura 4.14] Disseny de orces amb angle marcat i foils al timó.

En aquest treball es partirà de l'últim disseny proposat de manera que el perfil que caldrà buscar serà el de les pales del timó.

Així doncs se seleccionarà el perfil a partir d'una base de dades que rep el nom de "Airfoil Tools" on es poden trobar molts perfils diferents i populars tant per la navegació aèrea com nàutica. L'elecció estarà basada en trobar un perfil que ofereixi una bona eficiència, és a dir, una relació òptima entre la força de sustentació i la força de resistència a l'avanç, el C_L i el C_D i un capcineig tant petit com sigui possible, per tant, un C_M baix.

4.5.1 Criteris de selecció

- Eficiència o rendiment

El primer que es mirarà per seleccionar els perfils serà la seva eficiència o rendiment, o el que és el mateix, el resultat de dividir el C_L entre el C_D i analitzar-lo amb diferents angles d'atac. Interessa que aquest gràfic doni la màxima eficiència per a un interval una mica ample d'angles ja que cal recordar que el Nacra 17 acostuma a navegar en mar obert on les onades són irregulars i fan que l'angle d'atac als perfils que s'estan analitzant vagi variant constantment.

- Coeficient de capcineig C_M

Com ja s'ha esmentat anteriorment un dels problemes més importants d'aquesta disciplina olímpica és la facilitat que presenta per enfonsar la proa els dies de vent mitjà-fort amb un mínim d'onada. És, per tant, molt prioritari buscar perfils de foils que minimitzin aquest fenomen i permetin un major control del vaixell en unes condicions de vent més variades. La base de dades que s'ha usat per a la tria del perfil proporciona un gràfic que enfronta el C_M en vers , així permet veure com varia aquest coeficient quan es va canviant l'angle d'atac del perfil. S'ha de tenir en compte que sempre que aquest coeficient sigui 0 o molt proper estarà indicant que el foil treballa en el seu punt de màxima eficiència.



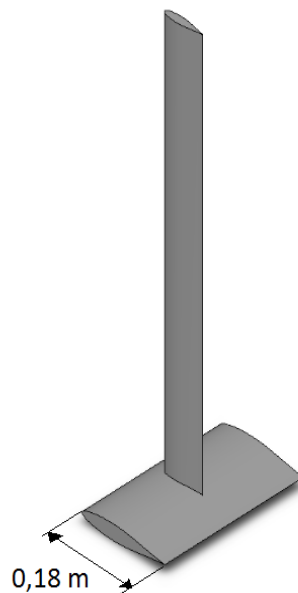
- Selecció a partir dels paràmetres requerits

Per calcular el número de Reynolds amb el qual caldrà treballar s'ha considerat el fluid a estudiar aigua de mar amb una densitat $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ i una viscositat cinemàtica de $\nu = 1,082 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. En quant a la velocitat mitjana a la qual navega el Nacra s'ha aproximat a uns 12 nusos que equivalen a 6 m/s. L'última dada necessària és la longitud de corda que cal que tingui el perfil del foil. Segons estudis realitzats en altres tipus de vaixells de vela lleugera que també necessiten foils al timó s'ha vist que aquests han de ser més aviat petits per no limitar la maniobrabilitat ni la sensibilitat que rep el patró a la mà. Així doncs es considera una longitud de corda de $c = 0,18 \text{ m}$.

Amb aquestes dades resulta un Re de:

$$Re = \frac{\rho v c}{\mu} = \frac{v c}{\nu} = \frac{6 \text{ m/s} \cdot 0,18 \text{ m}}{1,082 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 998152 \approx 1 \times 10^6$$

[Equació 4.4]

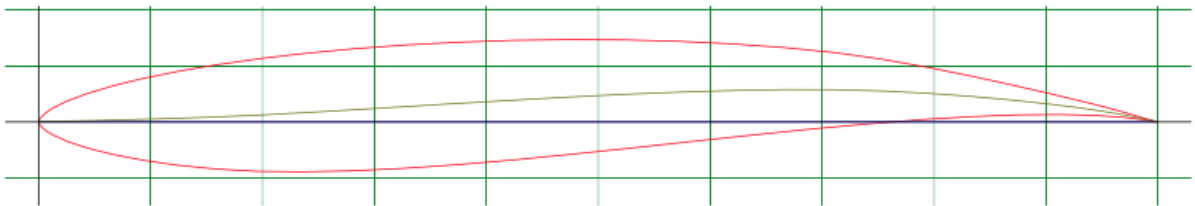


[Figura 4.15] Possible geometria del perfil dessitjat.

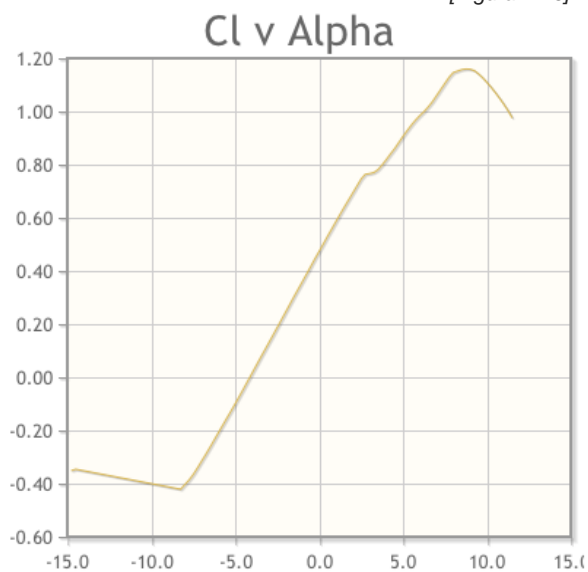
4.5.2 Anàlisi dels possibles perfils

Amb la mateixa base de dades Airfoil Tools, s'ha fet una preselecció de tots els perfils que estan pensats per a treballar com a *hydrofoils*. Es troben dues famílies que presenten aquest tipus de perfil, que són la família EPPLER i la família YS. En total sumen 10 perfils que entren a la selecció final, 7 dels quals pertanyen a la primera família; els 3 restants a la segona.

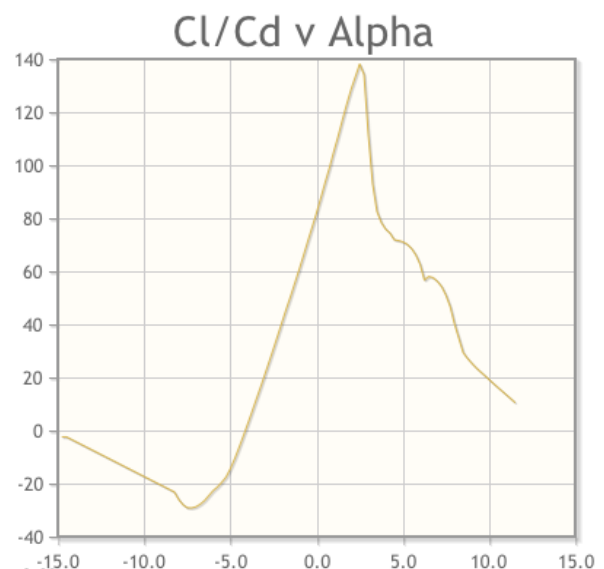
1. EPPLER 817



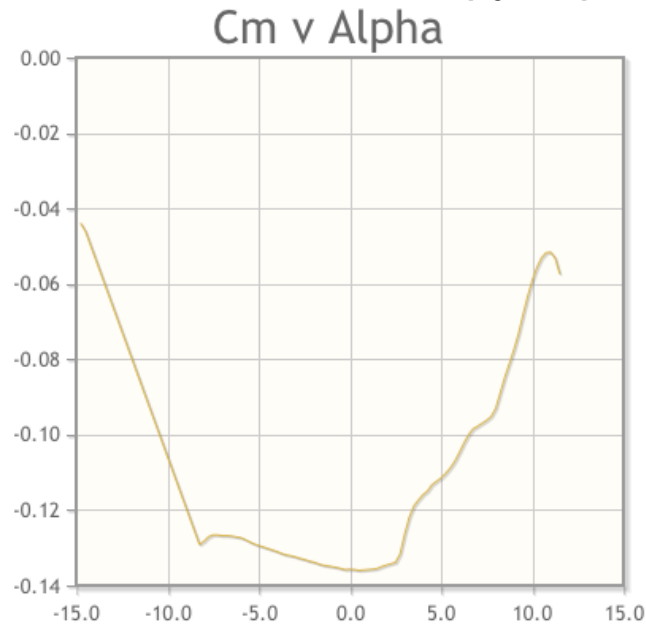
[Figura 4.16] Perfil Eppler 817.



[Figura 4.17] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.18] Gràfica del C_L/C_D vs α .



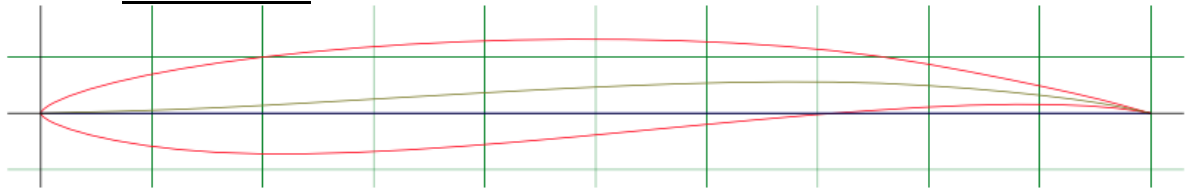
[Figura 4.19] Gràfica del C_M vs α .

En el primer gràfic que confronta el coeficient de sustentació amb l'angle d'atac es pot observar un pic a 8° sent el valor del C_L de 1,15. També ens informa de què aquest perfil entra en pèrdua a partir de 11° .

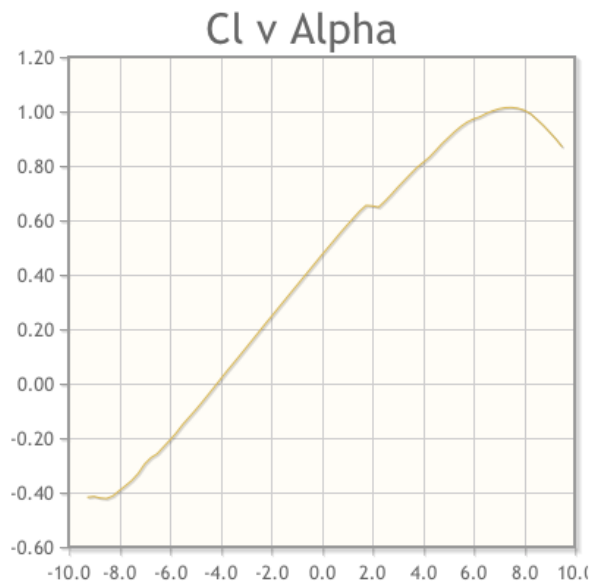
El segon gràfic informa del rendiment que ofereix l'EPPLER 817. El pic es troba amb una $\alpha=2,5^\circ$ i té el valor de 138,1. La forma d'aquest gràfic deixa entendre que a aquest pic de rendiment s'arriba amb un angle d'atac molt específic, és a dir, no presenta un interval d'angles per al qual l'eficiència sigui alta i constant.

Amb l'últim gràfic s'estudia quin coeficient de capcineig, C_M , ofereix el perfil per a diferents angles. Pels angles compresos entre -7° i $2,5^\circ$ l'E-817 dona un coeficient constant però negatiu. Aquest interval no coincideix amb el que dona un bon rendiment.

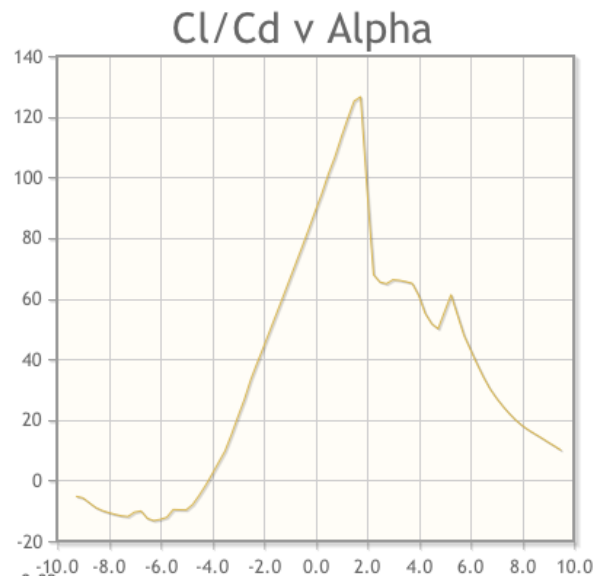
2. EPPLER 818



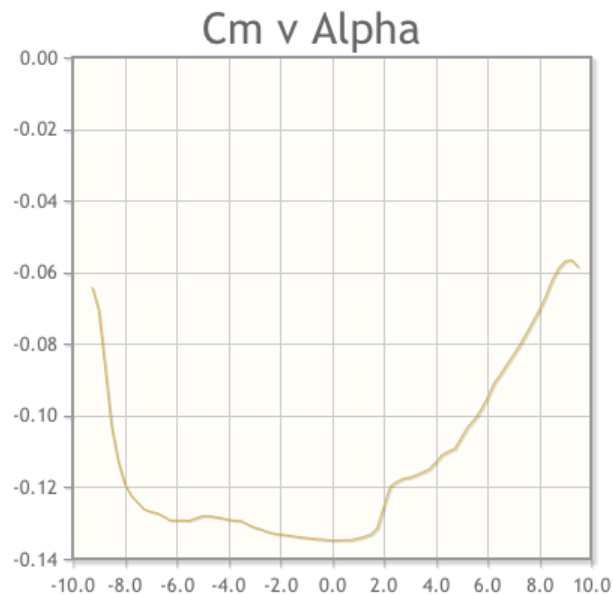
[Figura 4.20] Perfil Eppler 818.



[Figura 4.21] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.22] Gràfica del C_L/C_D vs α .



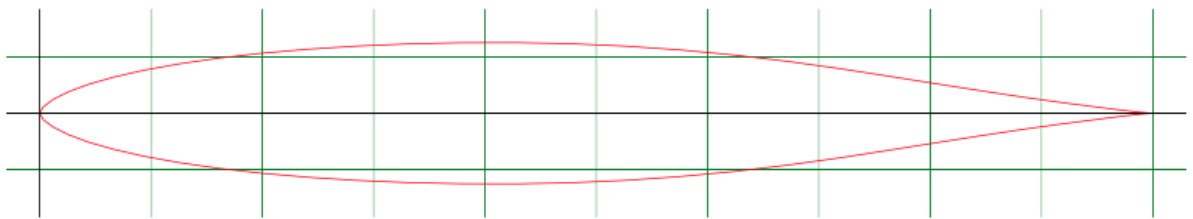
[Figura 4.23] Gràfica del C_M vs α .

Aquest altre model presenta una sustentació màxima, $C_{L\text{màx}}=1$, quan $\alpha=7^\circ$. De fet en aquest cas es podria parlar d'un petit interval entre 6 i 8° per al qual el perfil presenta un C_L constant al voltant de 1 . A continuació per a angles més grans que $9,7^\circ$ el perfil entra en pèrdua.

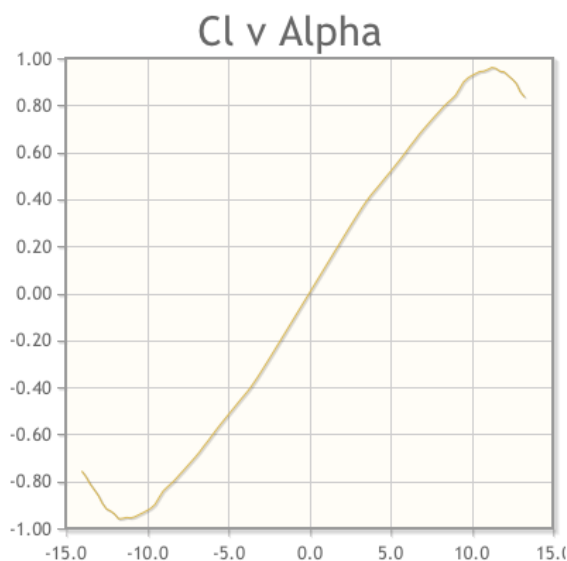
El segon gràfic, el del rendiment, es veu un pic per a $\alpha=1,75^\circ$ amb un valor de $126,6$. Un altre cop, com amb el perfil anterior, no s'observa un rang d'angles que presentin una eficiència constant i bona. En canvi, es té un pic aïllat i a continuació una gran diferència de rendiment per a angles molt propers.

En el tercer gràfic, el que es pot veure és que per uns angles entre -8 i 2° es té un C_M proper a $-1,13$ i bastant constant.

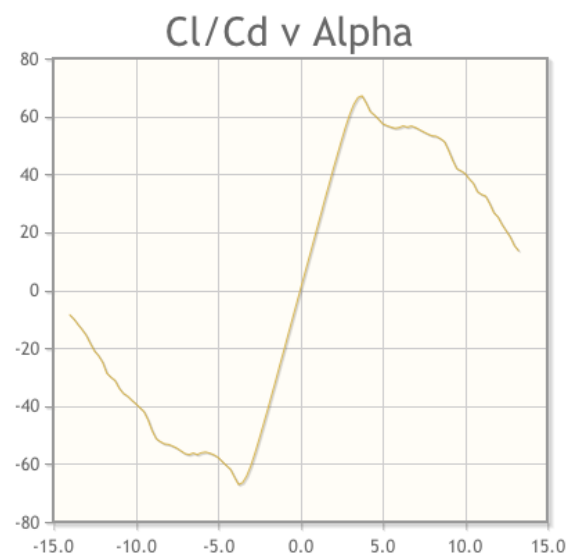
3. EPPLER 836



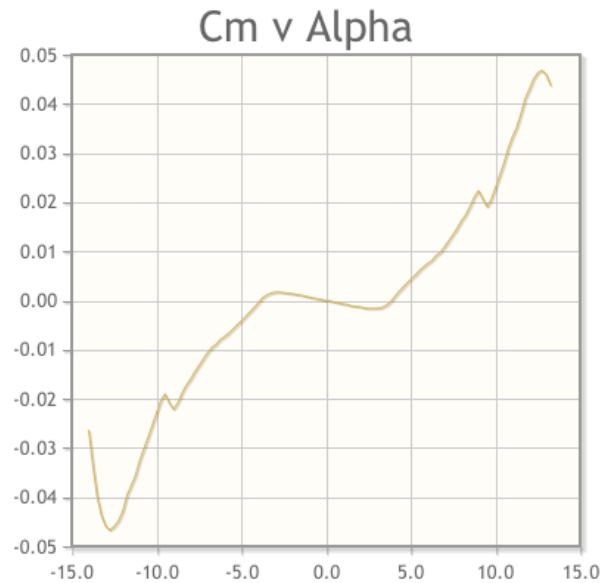
[Figura 4.24] Perfil Eppler 836.



[Figura 4.25] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.26] Gràfica del C_L/C_D vs α .



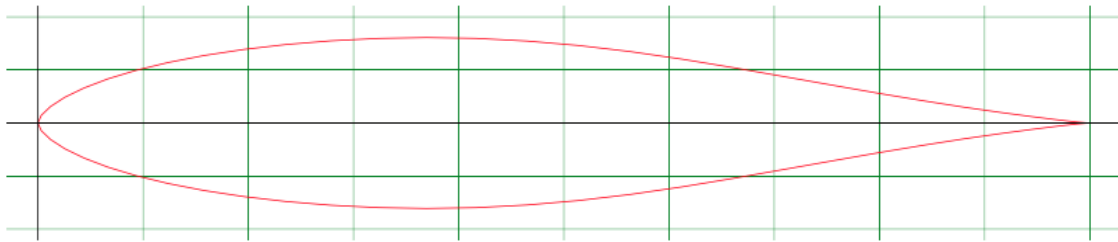
[Figura 4.27] Gràfica del C_M vs α .

Amb un angle d'atac de $\alpha=12^\circ$ l'E-836 té un $C_{L\text{màx}}$ de 0,96. En aquest cas també es pot destacar un petit interval d'angles que va des de 10 fins a 13 on aquest coeficient de sustentació és prou constant. Aquest perfil entra en pèrdua per un angle de 14° .

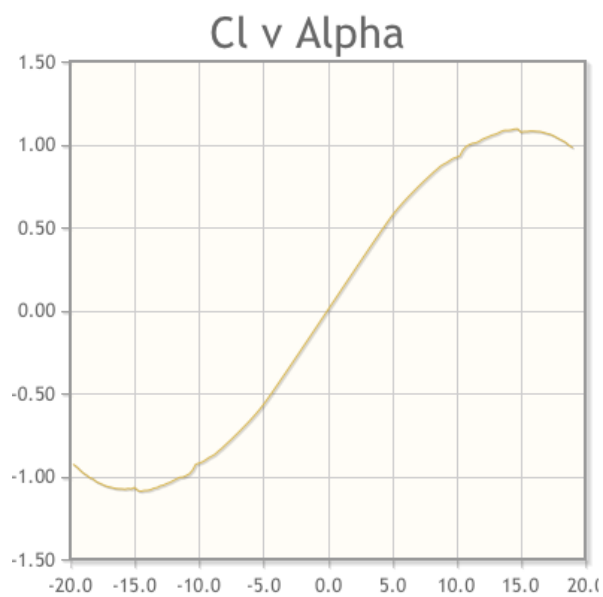
El rendiment que es veu en el segon gràfic té un màxim per a $\alpha=3,75^\circ$ i val 67,1. El rang que es considera en aquest segon gràfic amb un rendiment constant, tot i ser baix (a prop del 60%), aniria des de $2,5$ fins a $7,5^\circ$.

En el darrer gràfic s'observa una simetria per a 0° , deguda a la simetria que presenta el perfil mateix, això fa que es consideri un interval entre -4 i 4° on el coeficient de capcineig és molt constant i molt proper a 0.

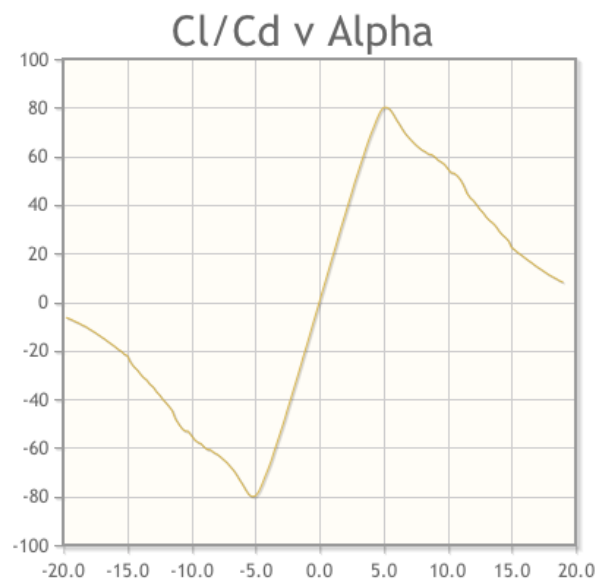
4. EPPLER 837



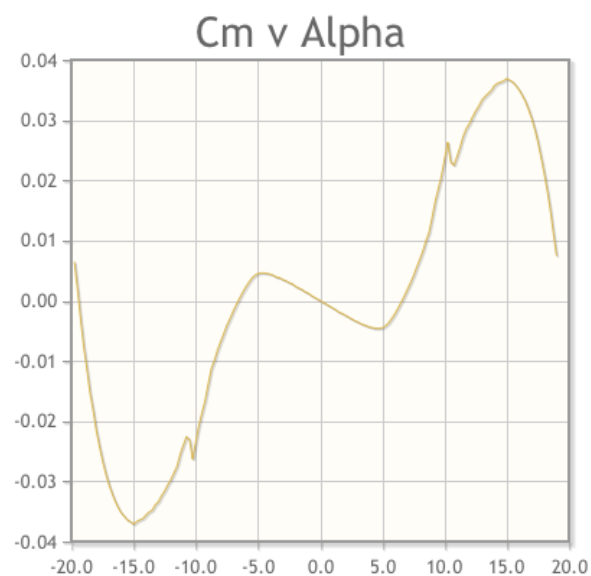
[Figura 4.28] Perfil Eppler 837.



[Figura 4.30] Gràfica del C_L/C_D vs α .



[Figura 4.29] Gràfica del C_L vs α .



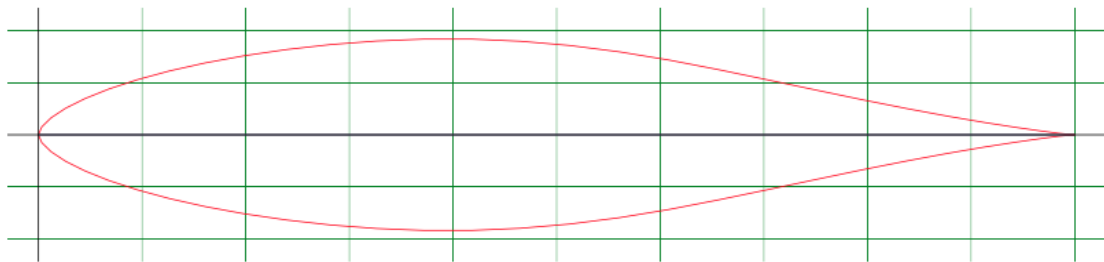
[Figura 4.31] Gràfica del C_M vs α .

En aquest perfil s'observa un pic en el coeficient de sustentació per a $\alpha=15^\circ$ amb un valor de 1,10. L'entrada en pèrdua es realitza per a un angles de 19° .

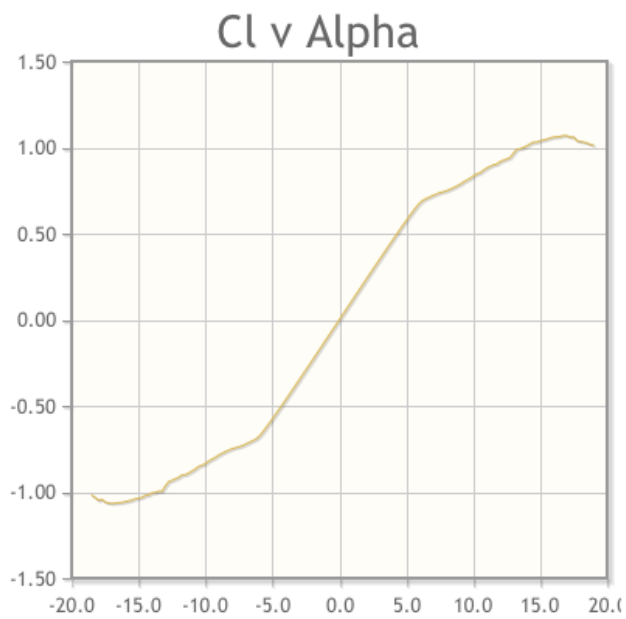
En la gràfica que representa l'eficiència del perfil es té el pic a 80,1 per a un angle de $5,25^\circ$. Per als angles entre 4 i 9 presenta un rendiment superior al 60.

En el darrer gràfic s'observa també una simetria deguda a la simetria mateixa del perfil. De manera que per als angles entre -5 i 5° es té un coeficient de capcineig molt proper a 0.

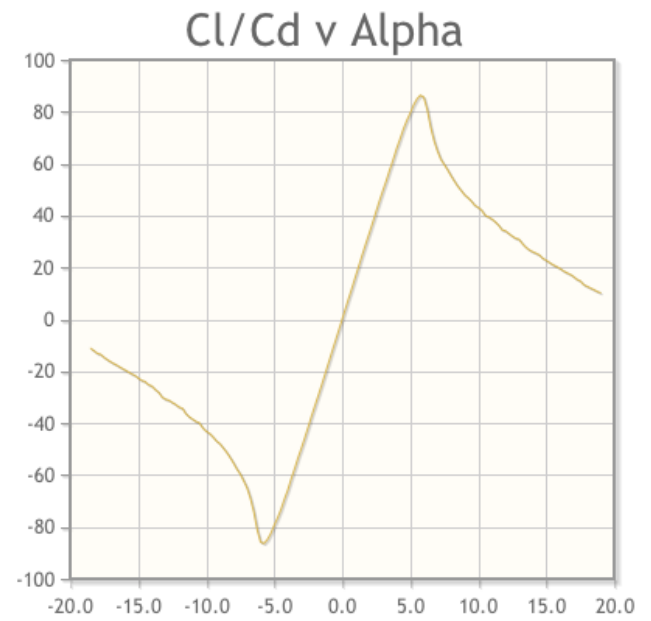
5. EPPLER 838



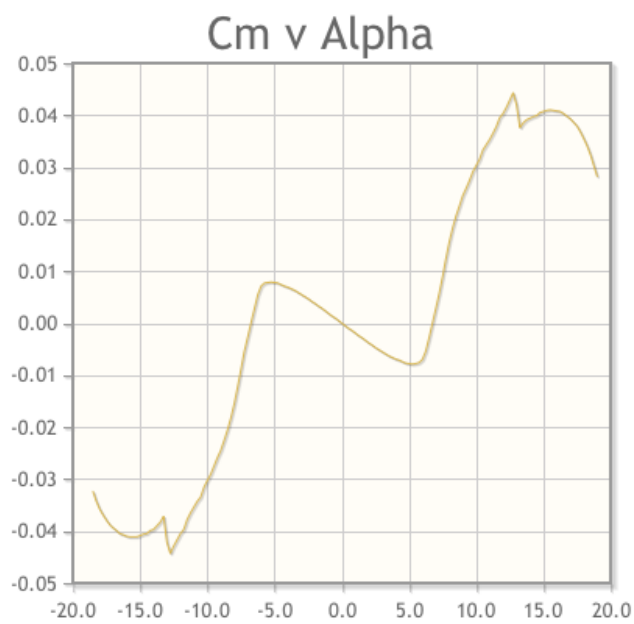
[Figura 4.32] Perfil Eppler 838.



[Figura 4.33] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.34] Gràfica del C_L/C_D vs α .



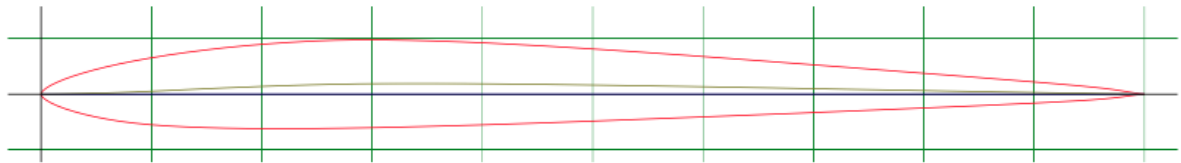
[Figura 4.35] Gràfica del C_M vs α .

Del primer gràfic s'observa un pic del C_L ja no tan accentuat presentant el seu màxim en 1,08 per a $\alpha=16,5^\circ$. Amb aquest perfil s'entra en pèrdua per a $\alpha=19,5^\circ$.

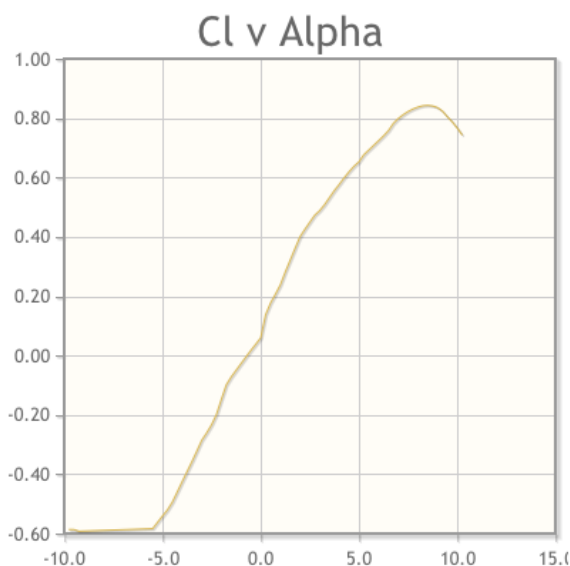
Per altra banda el rendiment de l'E-838 no té un interval ampli per al qual es tingui una eficiència acceptable. Té un màxim molt pronunciat per a $\alpha=5,75^\circ$ on el quocient C_L/C_D val 86,3. En seguida que es canvia l'angle d'atac per incrementar-lo o reduir-lo aquest rendiment varia bruscament.

Com aquest perfil torna a ser simètric, el C_M presenta també una simetria al voltant de 0. La diferència d'aquest perfil amb els dos anteriors recau en que l'interval en el què aquest coeficient és petit i proper a 0 és més estret.

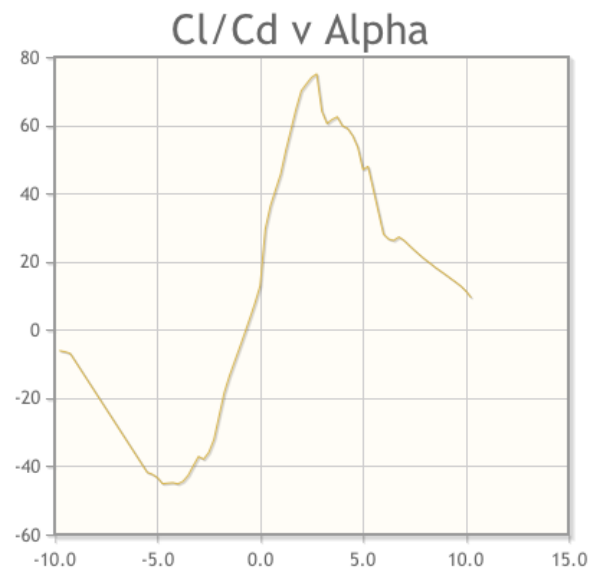
6. EPPLER 874



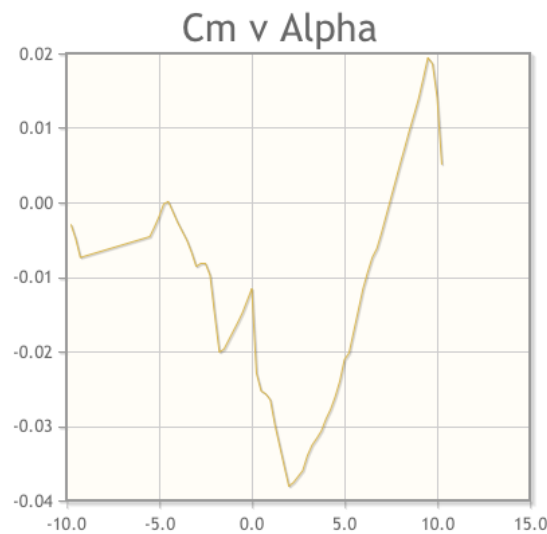
[Figura 4.36] Perfil Eppler 874.



[Figura 4.37] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.38] Gràfica del C_L/C_D vs α .



[Figura 4.39] Gràfica del C_M vs α .

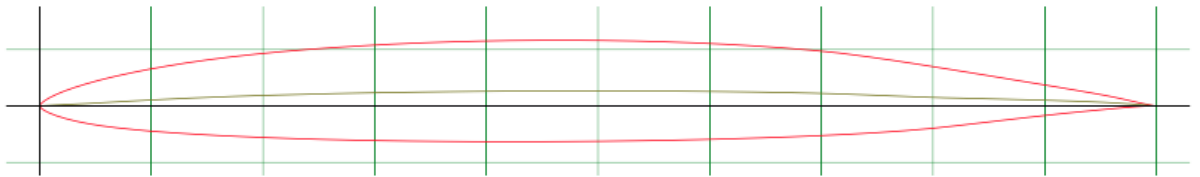
D'entrada es veu una clara diferència entre aquest perfil i els anteriors en quant a la forma. L'E-874 és molt estret i no és simètric.

La gràfica del C_L en vers l'angle d'atac és bastant semblant de forma al vist fins ara. Amb un màxim per $\alpha=8^\circ$ de 0,83 (una mica inferior). S'entra en pèrdua amb un angle de 10° .

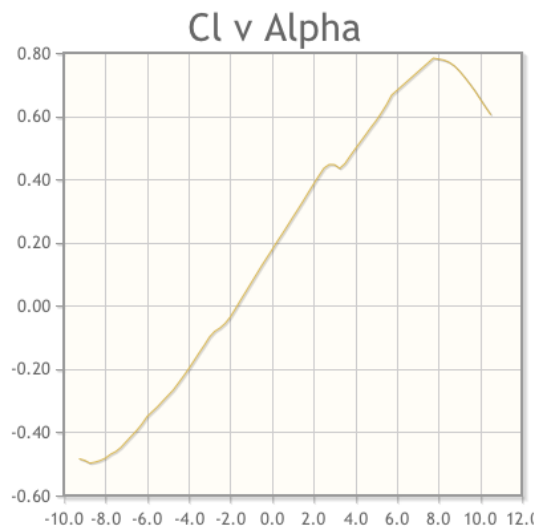
El que realment canvia d'aquest perfil són els dos següents gràfics. En el segon es veu un rendiment màxim de 75 per a $\alpha=2,75^\circ$, torna a ser més baix que els que s'han vist fins ara. A més la forma que presenta aquest perfil no dóna marge a l'angle d'atac per seguir sent eficient.

De l'última gràfica es veu que C_M és 0 per a un angle de $-4,9^\circ$ i després en seguida es fa negatiu i creix molt en valor absolut, cosa que no interessa per al Nacra17.

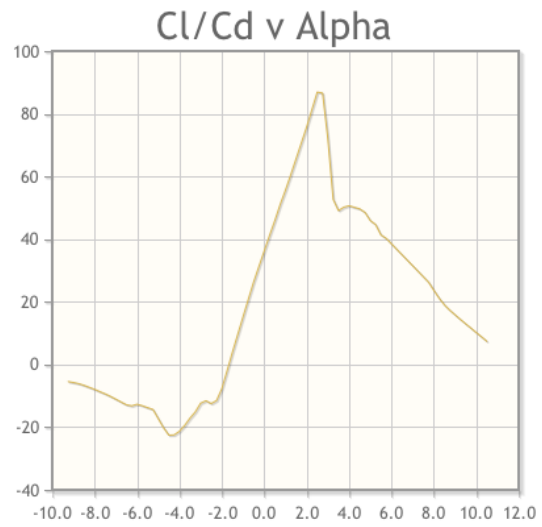
7. EPPLER 904



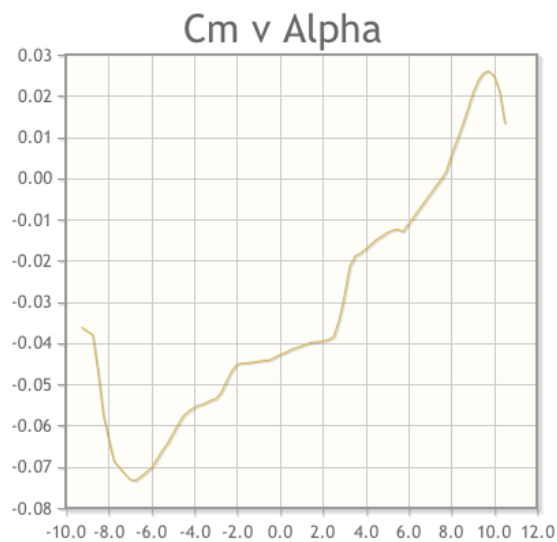
[Figura 4.40] Perfil Eppler 904.



[Figura 4.41] Gràfica del C_l vs α .



[Figura 4.42] Gràfica del C_l/C_d vs α .



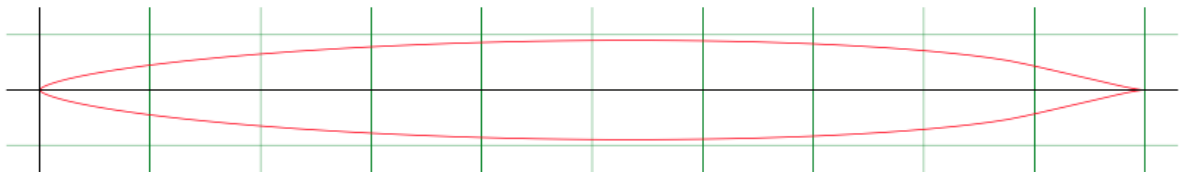
[Figura 4.43] Gràfica del C_m vs α .

La major sustentació que s'obté amb aquest perfil és e 0,80 per a un angle de 8° . Després per a un angle de 11° s'entra en pèrdua.

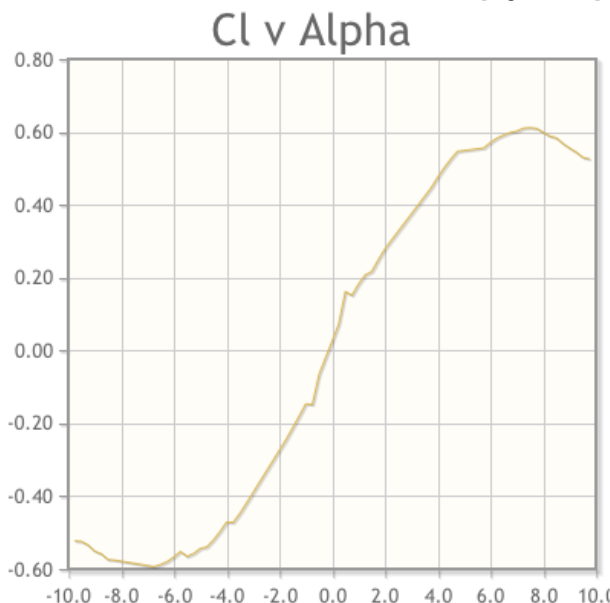
La gràfica que enfronta el C_L/C_D en vers torna a tenir el mateix inconvenient que es tenia amb l'E-874. És a dir, té un pic aïllat per a $\alpha=2,5^\circ$ de 86,9. Si després es miren altres valors d'propers a $2,5^\circ$ el rendiment baixa ràpidament. Per exemple, per a un angle de 4° es té un rendiment del 50%.

La gràfica del C_M tampoc és el que es busca precisament per als foils de les pales del timó del Nacra 17. Es veu que és 0 per un angle de $7,7^\circ$ però tots el valors al voltant d'aquest angle són molt diversos.

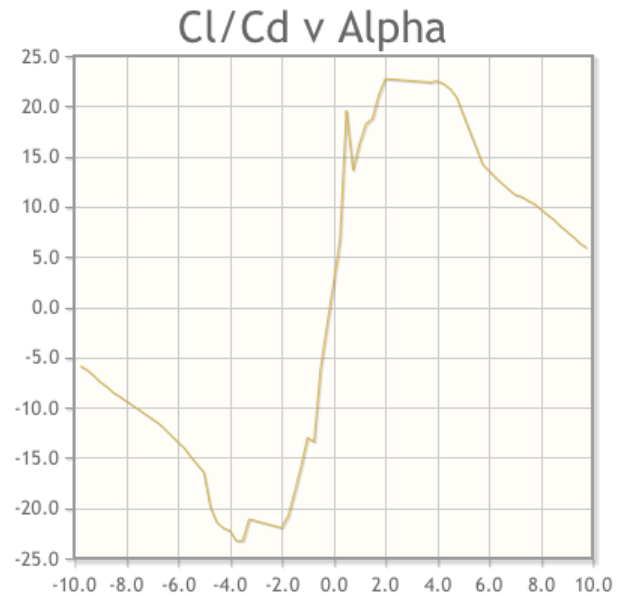
8. YS 900



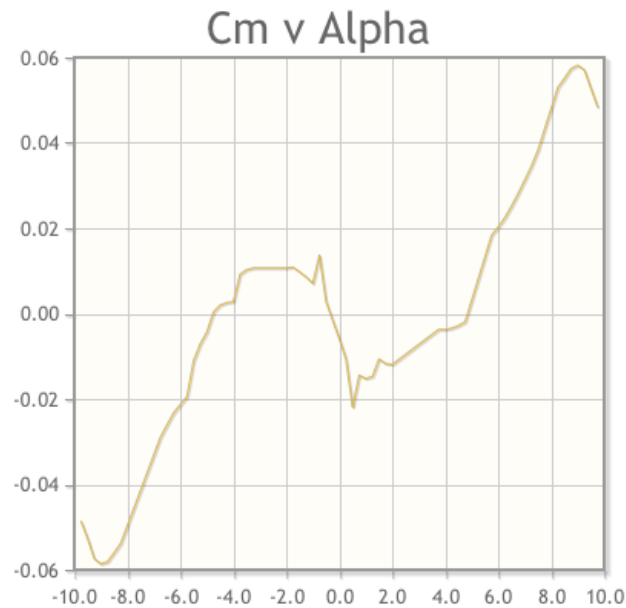
[Figura 4.44] Perfil YS 900.



[Figura 4.45] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.46] Gràfica del C_L/C_D vs α .



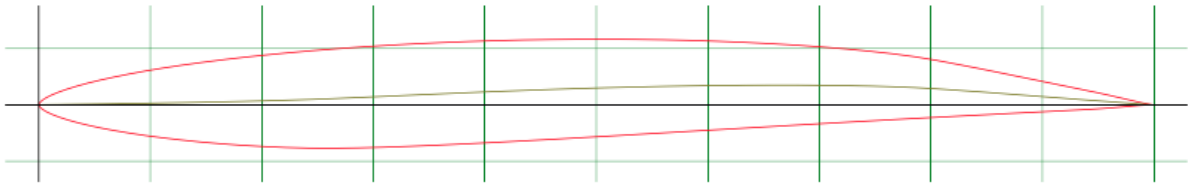
[Figura 4.47] Gràfica del C_M vs α .

El primer candidat de la família dels YS ofereix una sustentació màxima per uns angles entre 6 i 8°, essent aquesta de 0,6. Es veu que l'entrada en pèrdua es té per a un angle de gairebé 10°.

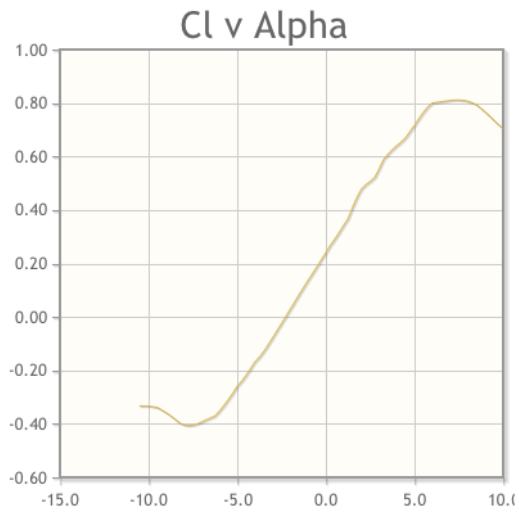
El rendiment màxim que s'observa del segon gràfic té el seu punt màxim amb un valor 22,7 per a un angle de $\alpha=2^\circ$. Molt baix en comparació als altres perfils estudiats anteriorment.

Del darrer gràfic que estudia el capcineig es veu una zona on el C_M es manté constant amb un valor de 0,1 per uns angles compresos entre -4 i -2°. Per contra, per a un C_M de 0 no hi ha un rang d'angles que mantinguin aquest coeficient constant.

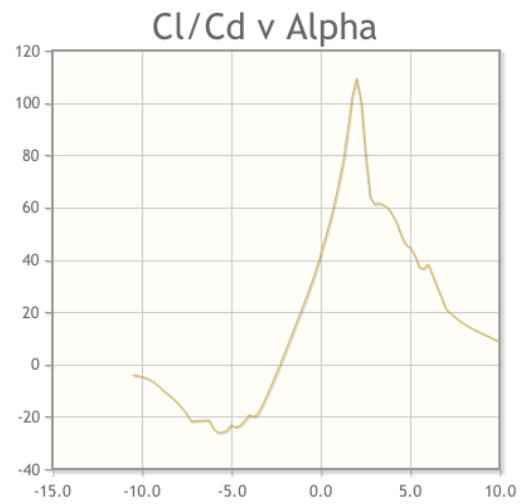
9. YS-915



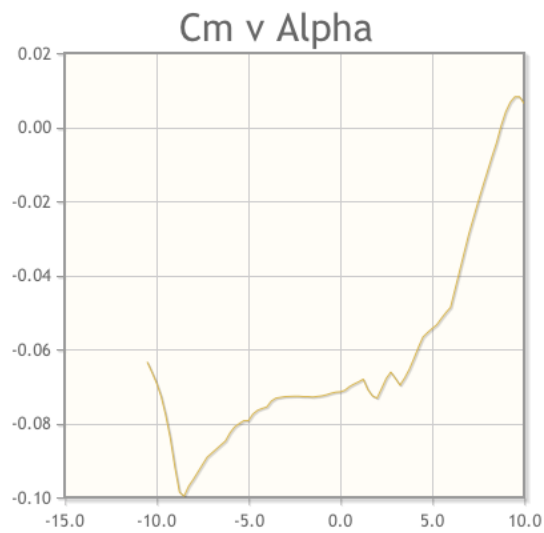
[Figura 4.48] Perfil YS 915.



[Figura 4.49] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.50] Gràfica del C_L/C_D vs α .



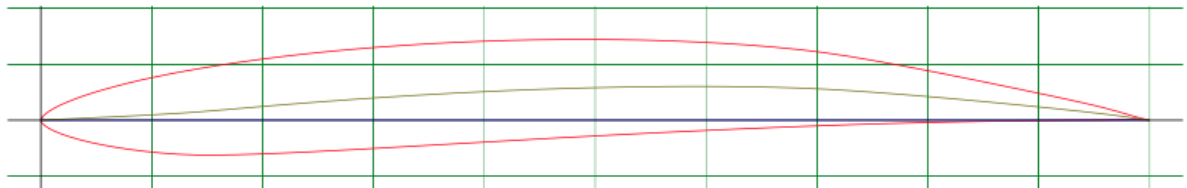
[Figura 4.51] Gràfica del C_M vs α .

La sustentació màxima que ofereix el YS-915 és de 0,8 per a angles entre 6 i 8°. Quan l'angle arriba a 10° el perfil entra en pèrdua.

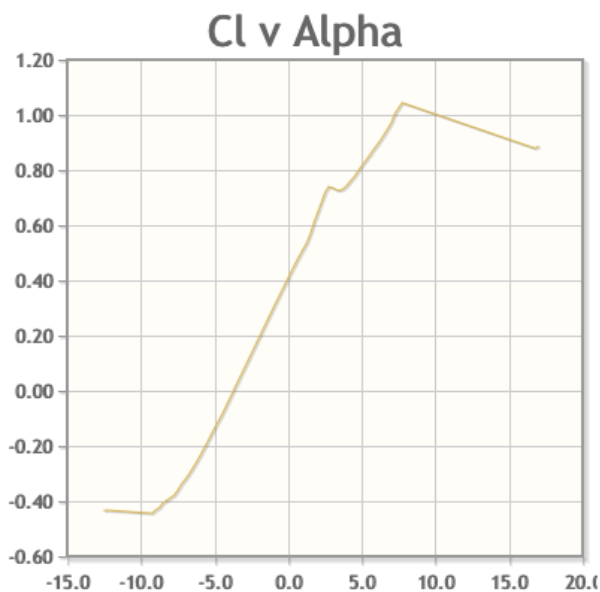
L'eficiència màxima d'aquest perfil és de 109,2 per un angle d'atac de 2°. En aquest cas es té un pic de màxim rendiment molt despuntat i solitari ja que si es miren valors d'angles més petits o més grans que 2° però molt propers, com per exemple, 1° i 3° el rendiment ja se'n va a 60.

El darrer gràfic mostra un C_M constant per a l'interval d'angles entre -4° i 1° essent però el valor del coeficient de -0,75. Cal recordar com ja s'ha esmentat anteriorment que valors negatius del C_M indiquen que no s'està treballant en el punt de màxima eficiència.

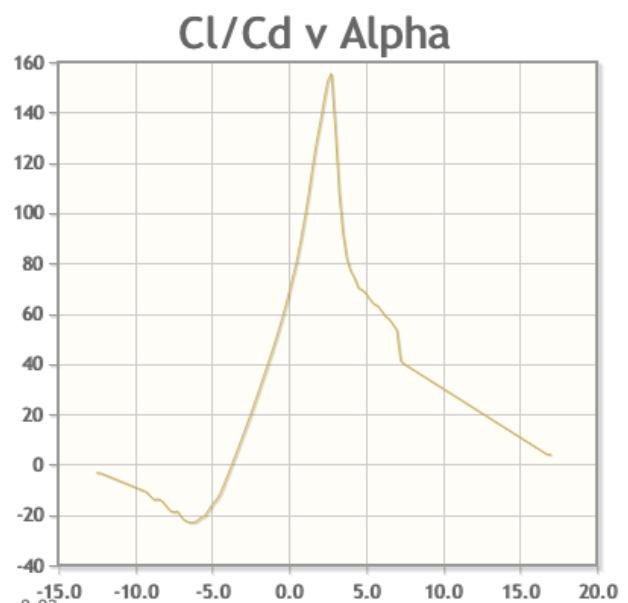
10. YS-930



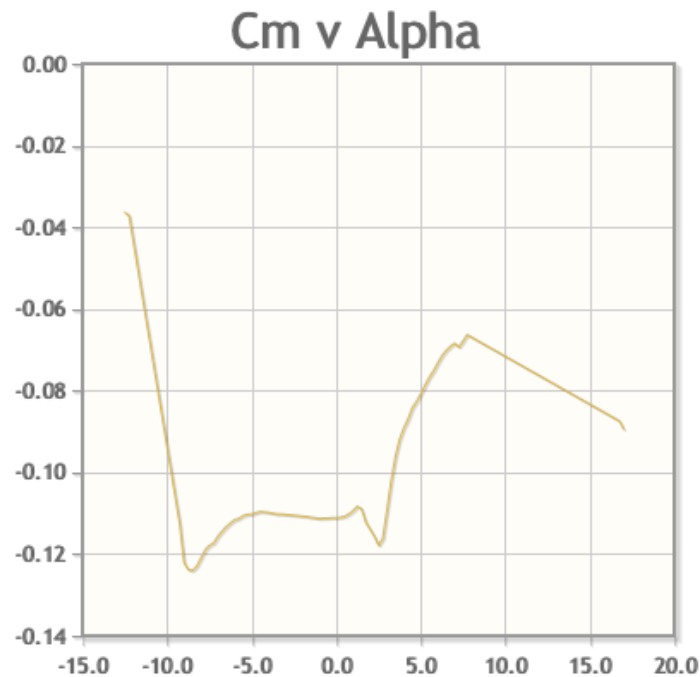
[Figura 4.52] Perfil YS 930.



[Figura 4.53] Gràfica del C_L vs α .



[Figura 4.54] Gràfica del C_L/C_D vs α .



[Figura 4.55] Gràfica del C_M vs α .

L'últim candidat dels perfils és l'únic que presenta una zona lineal en el gràfic que estudia la sustentació. L'angle que fa el $C_{L\max}$ és $7,5^\circ$ donant el valor de 1,04.

Amb el rendiment torna a passar el mateix que amb l'anterior perfil de la família YS, el YS-915. Es té un rendiment màxim molt alt però a la vegada molt solitari arribant al valor de 155,4 per a $\alpha=2,75^\circ$. Per a angles de 0 i 5° es tenen rendiments propers a 80, els quals són acceptables.

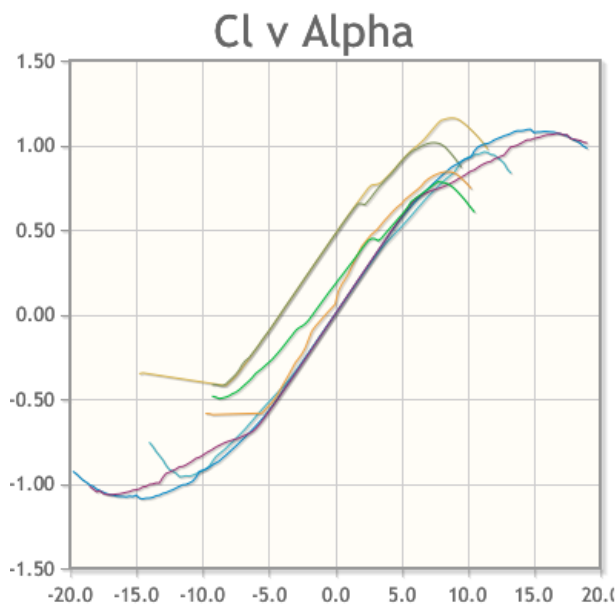
El gràfic del C_M mostra que aquest no és mai zero. Per contra es té una zona constant sobre un C_M de 0,11 per als angles entre -6° i 1° .

4.5.3 Comparativa dels perfils

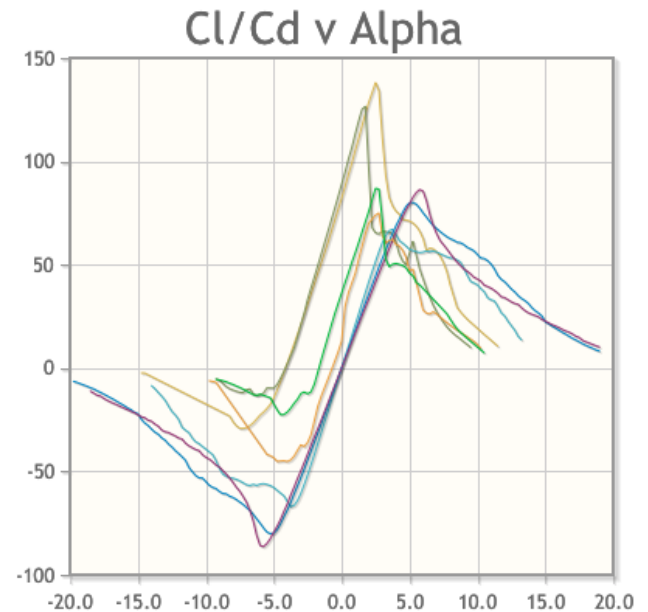
Un cop estudiats i analitzats els 10 perfils candidats a ser escollits per les pales del timó del Nacra 17 toca comparar-los entre ells i trobar el que millor satisfà els requisits essencials.

Per tal que sigui més clara la comparació, s'han classificat els perfils en les dues famílies, l'EPPLER i la YS. A continuació es mostren 6 gràfics, 3 de cada família, el primer confronta el C_L versus l'angle d'atac, en el segon es veu és la relació entre en C_L i el C_D versus l'angle d'atac i el tercer mostra el C_M versus l'angle d'atac.

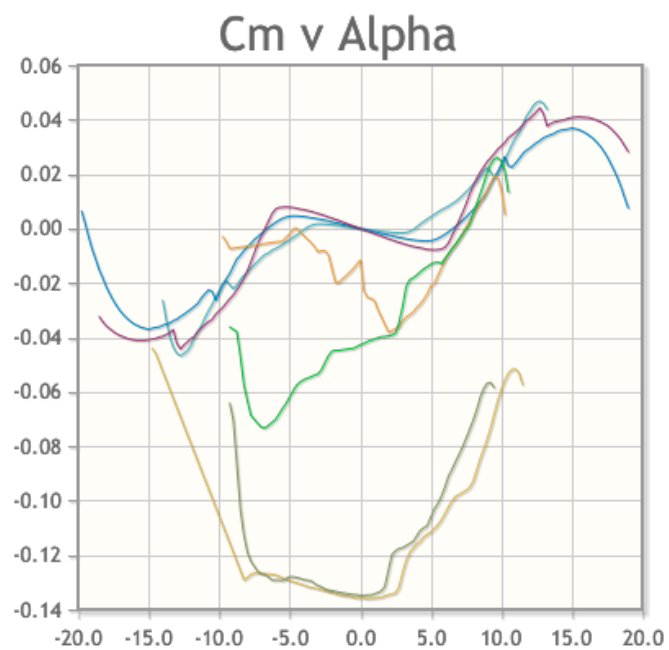
FAMÍLIA EPPLER



[Figura 4.56] Gràfica comparativa del C_L vs α .



[Figura 4.57] Gràfica comparativa del C_L/C_D vs α .



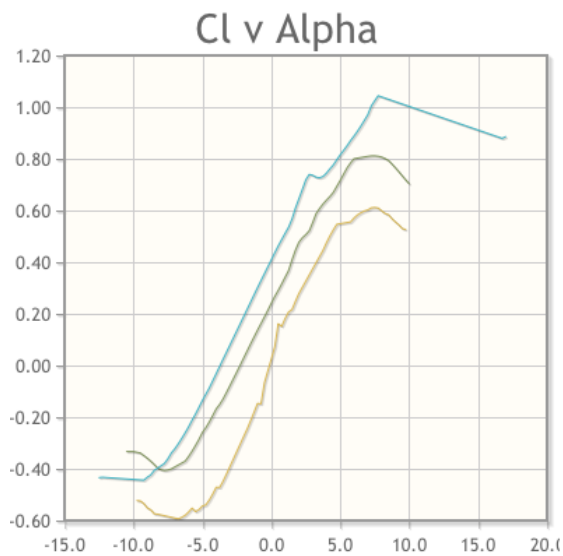
[Figura 4.58] Gràfica comparativa del C_M vs α .

Color Perfil Número de Reynolds

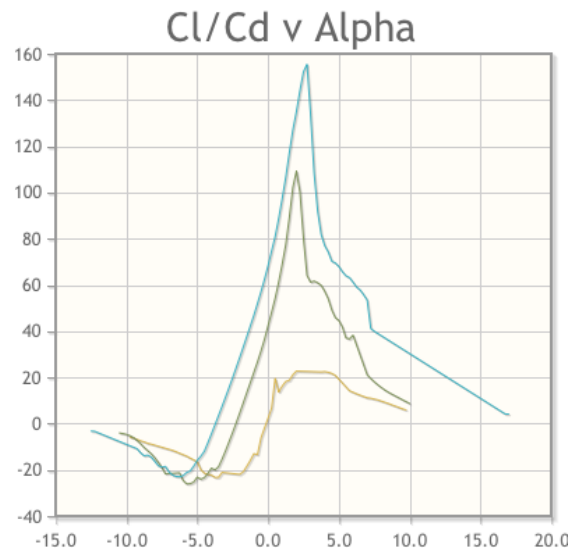
	<input checked="" type="checkbox"/> e817-il	1,000,000
	<input checked="" type="checkbox"/> e818-il	1,000,000
	<input checked="" type="checkbox"/> e836-il	1,000,000
	<input checked="" type="checkbox"/> e837-il	1,000,000
	<input checked="" type="checkbox"/> e838-il	1,000,000
	<input checked="" type="checkbox"/> e874-il	1,000,000
	<input checked="" type="checkbox"/> e904-il	1,000,000

[Figura 4.59] Llegenda de colors pels perfils de la família Eppler.

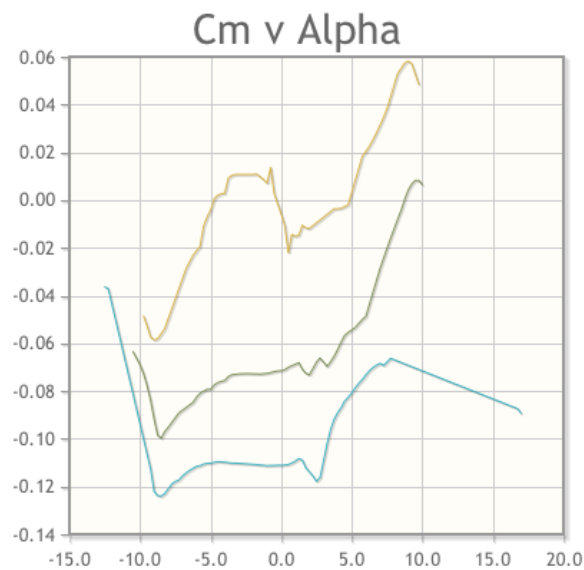
FAMÍLIA YS



[Figura 4.60] Gràfica comparativa del C_L vs α .



[Figura 4.61] Gràfica comparativa del C_L/C_D vs α .



[Figura 4.62] Gràfica comparativa del C_M vs α .

Color Perfil Número de Reynolds

<input checked="" type="checkbox"/>	ys900-il	1,000,000
<input checked="" type="checkbox"/>	ys915-il	1,000,000
<input checked="" type="checkbox"/>	ys930-il	1,000,000

[Figura 4.63] Llegenda de colors pels perfils de la família Eppler.

4.5.4 Decisió final

En aquest apartat es selecciona el millor candidat de cada una de les famílies i es comparen entre ells a partir de l'anàlisi individual de cadascún dels perfils i la comparativa general feta en els apartats anteriors.

- Família Eppler

Per començar, s'ha observat en el gràfic del C_L vs que el perfil que presenta un coeficient de sustentació més gran és el perfil del E-817. Però per altra banda la seva entrada en pèrdua és molt més agressiva que la dels perfil E-837 i E-838. En el cas de l'estudi del Nacra 17 té més pes el fet de tenir controlada la sustentació que no pas valors despuntats elevats per a un angle d'atac concret.

A continuació, s'ha observat en el gràfic de C_L/C_D vs que el perfil que aporta un rendiment hidrodinàmic major és el perfil Eppler 817. S'ha de tenir en compte que en la zona d'angles d'atac on treballarà el perfil, la diferencia de l'eficiència que aporten tots els perfil de l'estudi no és gaire representativa. De manera que els valors obtinguts per els altres perfils es consideren també acceptables, ja que un rendiment al voltant dels 70 a la zona d'estabilitat i treball és suficient per les necessitats de la embarcació.

Pel que fa al coeficient de capcineig interessa trobar un valor que al voltant dels 0° sigui estable i que el seu valor sigui negatiu i el més pròxim al zero possible. S'observa en el tercer gràfic de la família Eppler que els perfils E-836, E-837 i E-838 compleixen aquests requisits a la perfecció.

- Família YS

El perfil que ofereix una millor sustentació és el YS-930 tot i que també és el que té una entrada en pèrdua més accentuada en comparació amb els altres dos. Per als angles que està pensat que treballi el perfil el valor que dona el YS-915 és suficient i a més facilita el control de l'embarcació abans no entri en pèrdua.

En quant a l'eficiència que es pot observar en el segon gràfic per un interval d'angles d'atac d'entre 5 i 10 graus el millor candidat seria el YS-930. Els altres dos estan per sota del 40 i per tant no són atractius pel tipus de disseny de foils buscat.

Per últim, analitzant el coeficient de capcineig dels tres perfil preseleccionats de la família YS, es pot descartar el YS-900, ja que presenta valors positius per a angles d'atac propers als 0°. Entre el YS-915 i el YS-930 la diferència no és molta però com el que es desitja són valors negatius tan propers a 0 com sigui possible, el més òptim dels dos és el YS-915.

- Decisió

El perfil seleccionat de la família Eppler ha estat l'E-837 ja que resumint es podria dir que:

1. Presenta un coeficient de sustentació molt acceptable i una entrada en pèrdua progressiva de manera que oferiria un marge més ample de control per a la tripulació que navegui l'embarcació.



2. Aporta una eficiència propera a 70 per als angles d'atac en els què treballaria el perfil.
3. Presenta un valor del coeficient de capcineig molt proper a zero i negatiu per a l'interval d'angles d'atac en qüestió.

Per altra banda de la família YS el perfil que millor encaixa amb les necessitats del Nacra 17 és el YS-930 ja què:

1. Dels tres és el que té un coeficient de sustentació C_L més elevat.
2. Hi ha una diferència important entre l'eficiència d'aquest perfil entre els 5 i els 10° de l'angle d'atac i els altres dos de la mateixa família.
3. En quant al coeficient de capcineig que es té amb el perfil YS-930 entre els angles desitjats és proper a 0 i negatiu, per tant, s'apropa al que es busca per al Nacra 17.

De manera que la decisió definitiva que cal prendre és entre el perfil Eppler 837 i el YS-930.

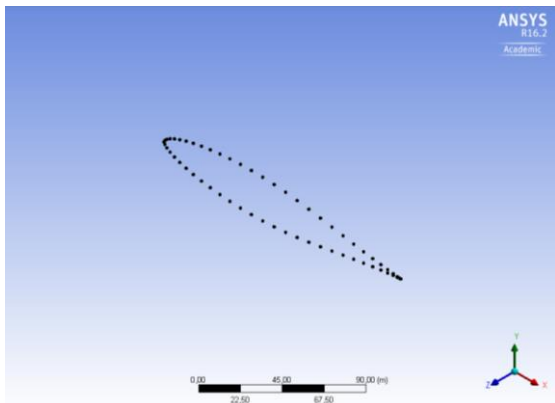
Pel que s'ha anat veient amb l'ajuda dels gràfics comparatius, el perfil que cobreix millor els requisits del Nacra 17 és l'**EPPLER 837**.

De manera que es farà l'estudi de la simulació d'aquest perfil.

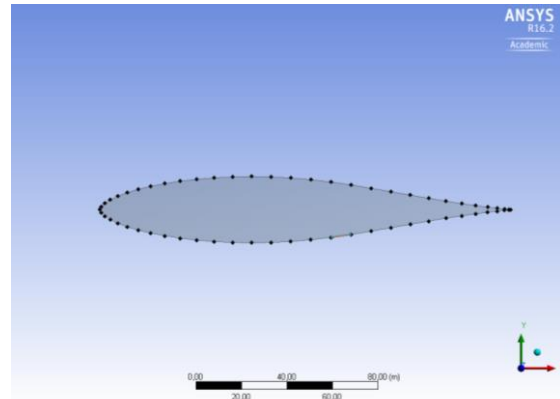
5. SIMULACIÓ

El programa Fluent fa seguir uns passos molt concrets a l'hora de portar a terme la simulació d'un perfil.

En primer lloc cal definir la geometria, per això, s'exporta un fitxer directament de la pàgina web Airfoil Tools, on hi ha 61 punts que defineixen el perímetre del perfil. Aquests punts cal unir-los un a un amb línies. A partir d'aquestes línies es crea una superfície que serà la que es mallarà en el següent pas i se li dona un angle d'atac, per exemple 8° . Un cop es té la geometria desitjada el següent pas és dibuixar el domini de fluid. En aquest cas es fa un domini en forma de

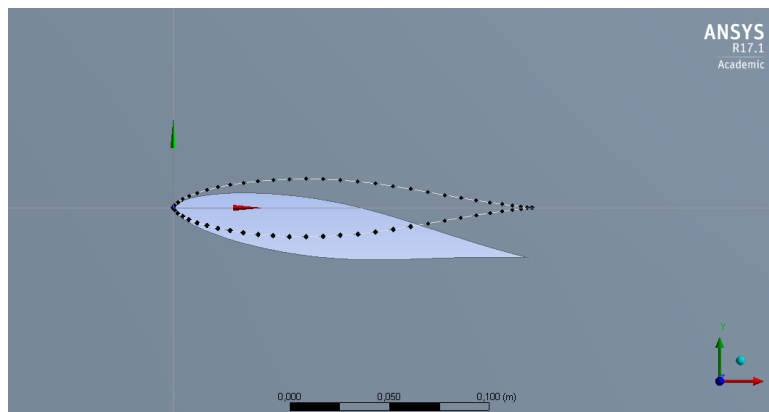


rectangle.



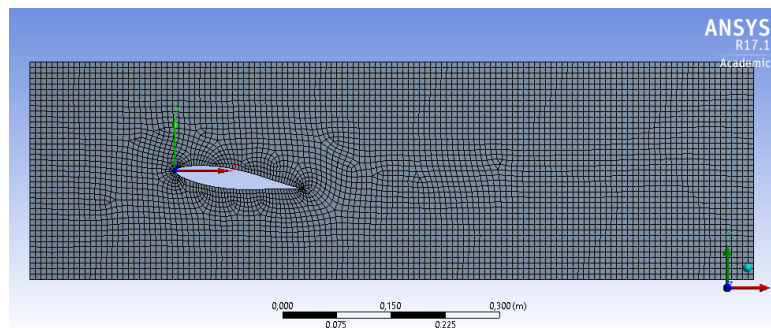
[Figura 5.1] Punts que defineixen el perímetre del perfil.

[Figura 5.2] Superfície creada a partir de les línies que uneixen els punts.



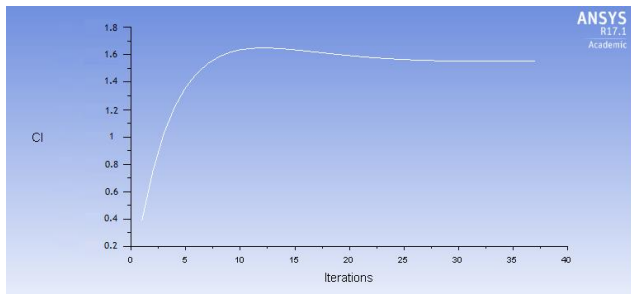
[Figura 5.3] Perfil amb un angle d'atac de 8° .

Així doncs, es procedeix a mallar. En aquest pas cal situar el sistema de coordenades. L'estudi s'ha realitzat amb aquest sistema a la vora d'atac com es veu a la figura de continuació. El primer que cal fer dins del "Meshing" és escollir les condicions de contorn del perfil. S'ha escollit mallar amb quadrats amb un *sizing* petit ja que d'aquesta manera s'agilitza el programa, a més s'adapten suficientment bé a la geometria i aporten una bona densitat de nodes en determinades zones. El refinament triat ha estat de 4.

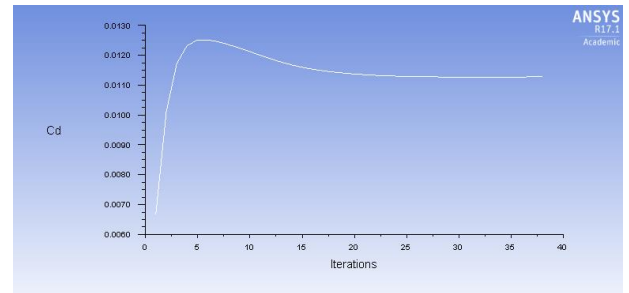


[Figura 5.4] Mallat realitzat.

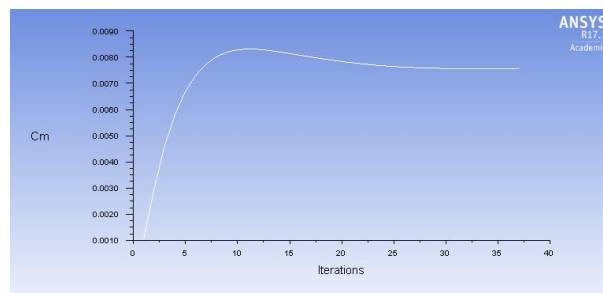
Tot seguit cal personalitzar la pantalla de *Setup*. Per defecte està tot seleccionat com ja interessa. Bàsicament aquí es defineix si el problema és estacionari (Steady) o transitori (Transient), aquest estudi es realitza quan el Nacra ja està navegant enlairat, és a dir, règim estacionari. Després cal seleccionar el model de turbulència adequat. En aquest estudi s'utilitza el model de turbulència k-epsilon. També es demana introduir les propietats del fluid amb el que es troba en contacte el cos i també amb quines unitats es vol treballar. Per últim cal definir quina és la velocitat d'anàlisi. Com ja s'ha esmentat anteriorment l'estudi es fa a 6 m/s que són aproximadament 12 nusos (velocitat mitjana del Nacra 17 amb condicions de vent normals). Se li demana al programa que inicialitzi els càlculs amb 2000 iteracions i el coeficient de sustentació (C_L), el de resistència (C_D) i el de capcineig (C_M) que resulten són els següents:



[Figura 5.5] Gràfic del C_L amb un angle d'atac de 8° .



[Figura 5.6] Gràfic del C_D amb un angle d'atac de 8° .



[Figura 5.7] Gràfic del C_M amb un angle d'atac de 8° .

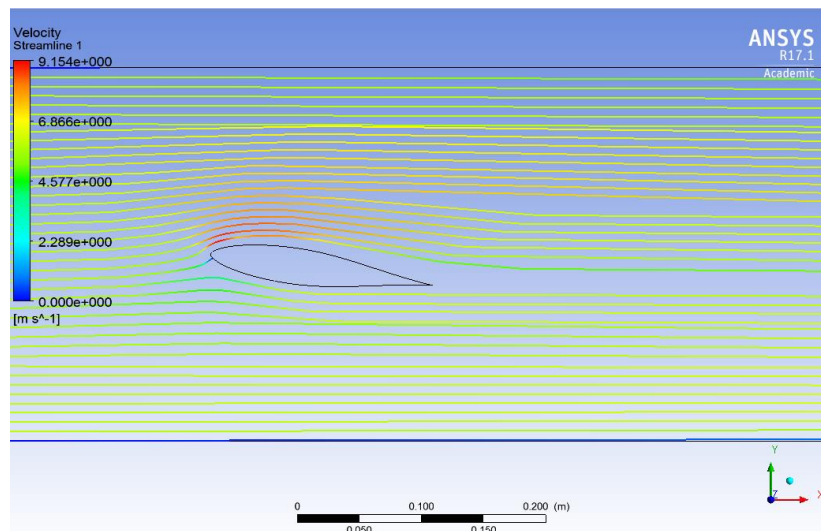
L'anàlisi realitzat amb el Fluent revela que el perfil Eppler 837 té un C_L de 1,6, més gran que el que diu la base de dades Airfoil Tool que era de 0,85. Tant el C_D com el C_M són petits, la qual cosa és interessant per l'estudi.

Finalment ja es pot anar a la pantalla de resultats on s'analitzen i interpreten les solucions com s'observa a continuació.

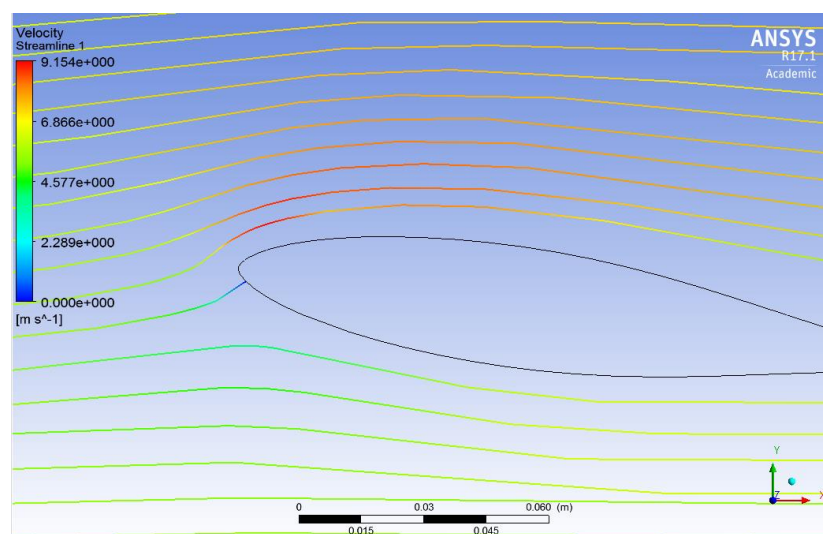
5.1 ANÀLISI I INTERPRETACIÓ DE LES SOLUCIONS 2D

5.1.1 Línies de corrent

Mitjançant les línies de corrent que es mostren a la figura, es veu la direcció de les partícules al voltant del perfil. Com es pot observar existeix una línia de corrent que va a parar al punt d'estancament ($u = 0$ m/s) i marca la separació de les línies que viatjaran per l'extradós i les línies que viatjaran per l'intradós.



[Figura 5.8] Diagrama de velocitats amb línies de corrent.



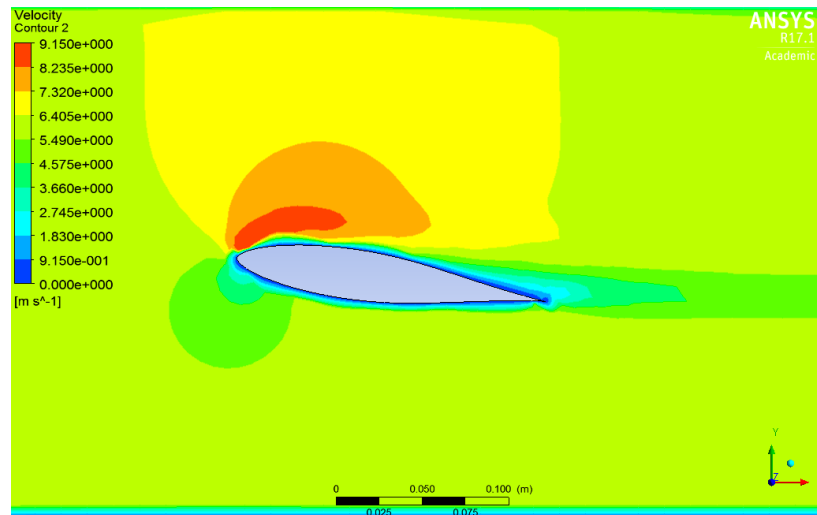
[Figura 5.9] Zoom on es veu la velocitat nula en el punt d'estancament.

5.1.2 Velocitats

A la següent imatge es veu la distribució de velocitats entorn el perfil. En aquest cas s'observa com les velocitats de l'extradós i les de l'intradós no són iguals degut a l'angle d'atac. S'observa també que la velocitat en els punts més propers al perfil és més baixa degut a la força de fricció existent entre el perfil i l'aigua.

La velocitat d'entrada del sistema es de 6 m/s que equival a 12 nusos, és a dir, la velocitat a la qual el Nacra estaria en sustentació.

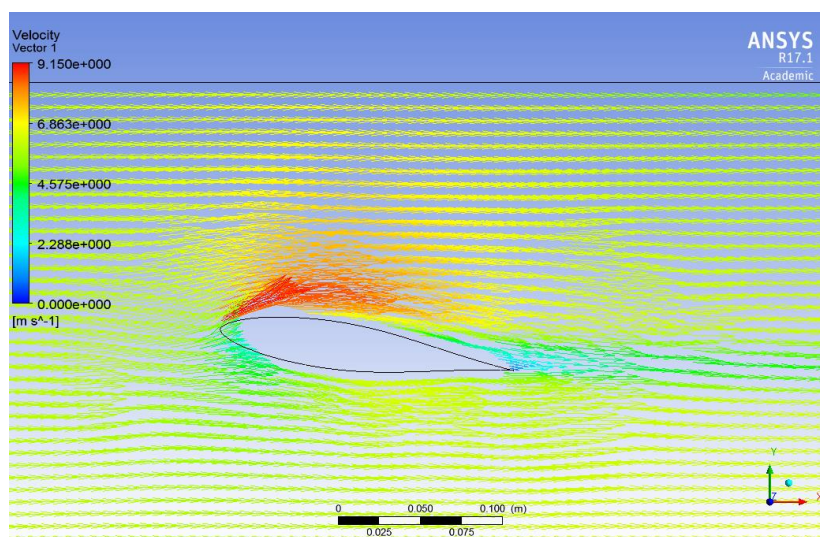
La velocitat màxima a la que s'arriba, com es veu en la figura, és de 9,15 m/s mentres que la mínima és al punt d'estancament i és de 0 m/s.



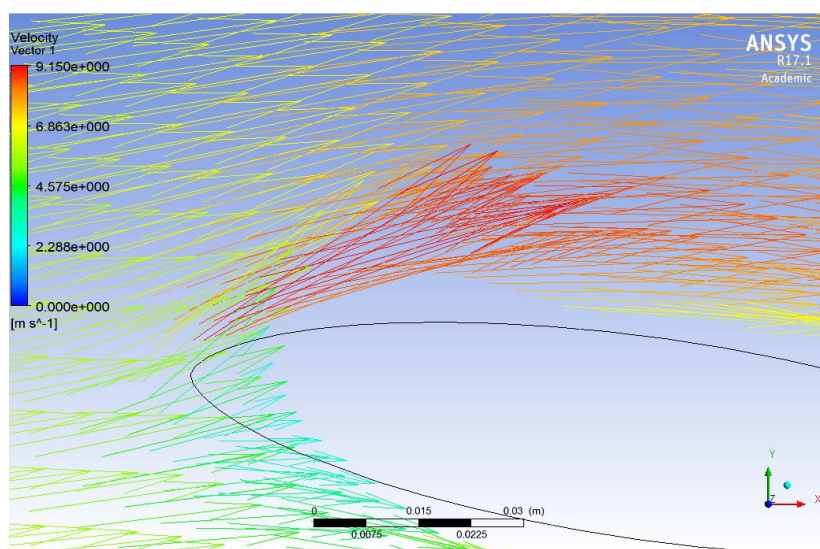
[Figura 5.10] Diagrama de velocitats.

En la distribució vectorial de la velocitat mostrada a continuació es pot observar com en el caire d'atac és on es té una component vertical de la velocitat.

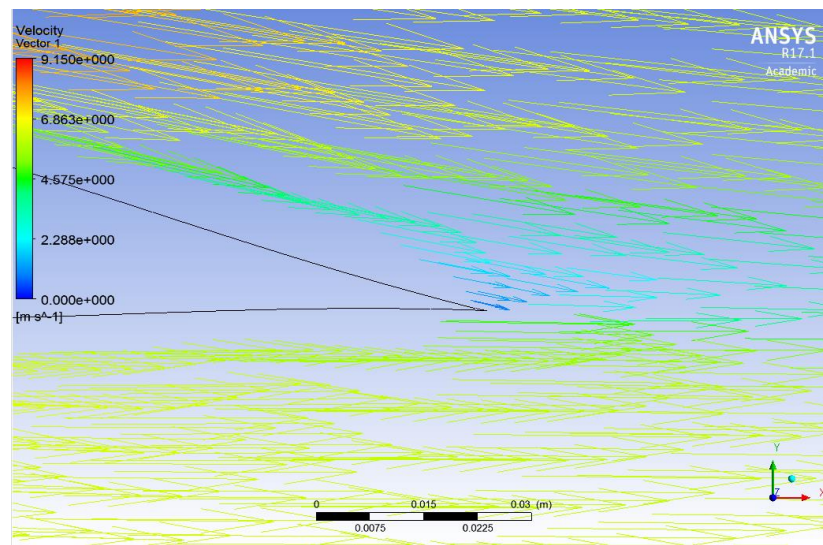
És interessant veure com els vectors s'ordenen a mesura que recorren el perfil, passant d'una capa límit laminar a la capa límit turbulenta, per finalment desprendre's la capa límit molt a prop del caire de sortida.



[Figura 5.11] Estudi vectorial de la velocitat.



[Figura 5.12] Velocitat màxima.



[Figura 5.13] Separació de la capa límit.

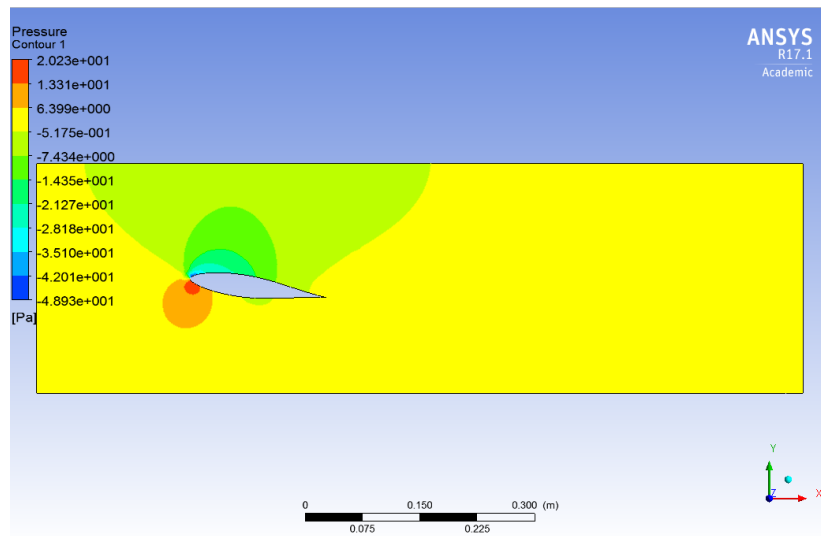
5.1.3 Pressions

El valor de la pressió absoluta P_{ABS} és la suma de dos tipus de pressions, l'atmosfèrica i la relativa:

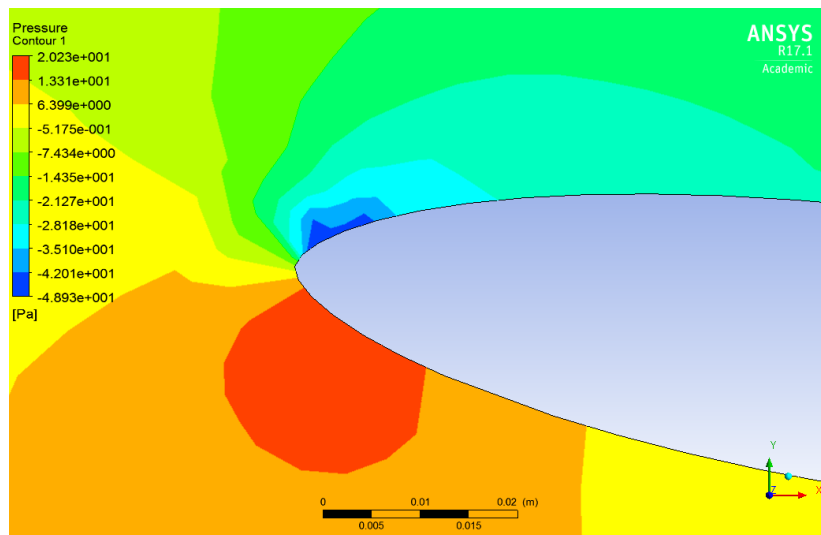
$$P_{ABS} = P_{ATM} + P_{REL}$$

Es pot definir la pressió atmosfèrica com la força que l'aire exerceix sobre l'atmosfera en qualsevol dels seus punts.

La pressió relativa, en canvi, es mesura en relació amb l'atmosfèrica. El que determina doncs és la diferència existent entre la pressió absoluta i l'atmosfèrica. Aquesta darrera es pot separar també en dues pressions diferents; la pressió estàtica que és la pressió que exerceix el fluid sobre un pla paral·lel a la direcció del corrent deguda al xoc de les molècules com a conseqüència d'un moviment aleatori. En el cas d'aquest treball, aquesta inclou la pressió hidrostàtica, que és la pressió que exerceix el fluid a una profunditat $-h-$ de 1,7m. Per altra banda està la pressió dinàmica que depèn de la velocitat i de la densitat del fluid i es causada per la inèrcia del moviment del fluid que produeix un increment addicional a la pressió estàtica quan es produeix una col·lisió sobre una àrea perpendicular al moviment.



[Figura 5.14] Diagrama de la distribució de la pressió relativa.



[Figura 5.15] Distribució de la pressió en el punt d'estancament.

$$P_{REL MÀX} = 20,23 Pa$$

$$P_{REL MÍN} = -48,93 Pa$$

5.1.4 Cavitació

Un cop analitzats els diagrames de pressions, cal observar si els valors de pressions obtinguts estan dins dels rangs que no permeten l'aparició de cavitació. Per tal que no apareixi cavitació en la superfície del *hydrofoil* cal que

la pressió absoluta sigui superior que la pressió del vapor. La pressió de vapor de l'aigua salada a 15°C és de 1720,5 Pa.

Per tal de veure si es produeix el fenomen de cavitació, es mira si la pressió absoluta mínima està per sota de la pressió de vapor. El punt amb pressió absoluta mínima que trobarem al voltant del perfil coincideix amb el punt on la pressió relativa és més petita.

$$P_{ABS\ MÍN} = P_{REL\ MÍN} + P_{ATM} = -48,93\ Pa + 101,325\ Pa = 52,395\ Pa$$

Es remarca que la P_{ABS} mínima està per sobre del valor de la pressió de vapor, per tant, es pot assegurar que no apareixerà cavitació al voltant del perfil seleccionat en aquestes condicions del fluid.

6. PRESSUPOST I PLANIFICACIÓ

El pressupost estimat en aquest treball cobreix la part d'investigació sobre els possibles foils que es podrien triar pel Nacra 17 i la posterior decisió final i la simulació del perfil escollit.

Se suposa un període de duració de sis mesos per a realitzar aquest anàlisi. De manera que els costos es poden dividir en 3 categories:

- Costos de personal
- Costos de serveis
- Costos de material

6.1 COSTOS DE PERSONAL

El personal que intervenen en aquest projecte consisteix en:

- Un enginyer, encarregat d'estudiar les necessitats del Nacra 17 en condicions de navegació i d'avaluar els possibles perfils.
- Un informàtic, que processa la base de dades de la pàgina web utilitzada (Airfoil Tools) i realitza la simulació del perfil escollit amb el programa Fluent.
- Un becari, la feina del qual consisteix en ajudar a agilitzar la feina en general.
- Un equip de neteja, el qual permet que l'oficina estigui en condicions òptimes de treball.

La taula de continuació permet veure la suma total d'hores i de costos de personal.

PERSONAL	HORES	COST/HORA [€]	TOTAL [€]
Enginyer	275	20	5.500



Informàtic	30	20	600
Becari	200	8,5	1.700
Neteja	48	8	384
COSTOS TOTAL DE PERSONAL			8.184

6.2 COSTOS DE SERVEIS

Els serveis que han calgut per a la realització d'aquest estudi inclouen una línia de telèfon, internet, aigua i electricitat.

SERVEI	TOTAL [€]
Telèfon i Internet	200
Aigua	250
Electricitat	300
COSTOS TOTALS SERVEIS	750

6.3 COSTOS DE MATERIAL D'OFICINA

En quant als costos que es tenen degut al material requerit a l'oficina, es contempla des de folis per escriure, fins a les llicències dels programes informàtics que s'han fet servir. Cada cost es mostra en la taula a continuació.

MATERIAL	TOTAL [€]
Paper	150
Tinta impressora	450
Llicència Fluent 17.0	4.000
Llicència VisualFoil 6.0	150



Llicència pack Office	900
COSTOS TOTALS MATERIAL D'OFICINA	5.650

COSTOS TOTALS PROJECTE	14.584 €
-------------------------------	-----------------

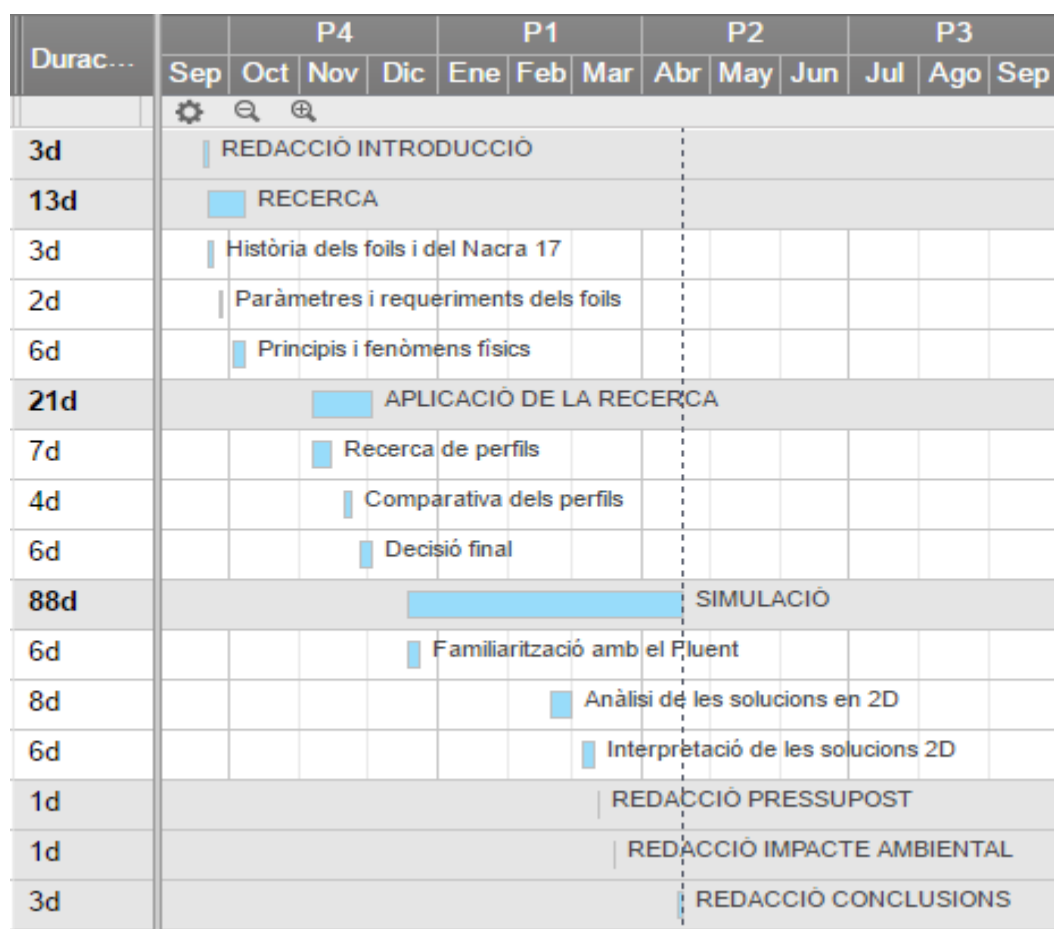
6.4 PLANIFICACIÓ

Aquest projecte s'ha anat realitzant majoritàriament durant el quadrimestre de tardor de 2016. La part de simulació s'ha fet durant els primers mesos del 2017 tal i com mostra la taula i el diagrama de Gantt de continuació.

	Nombre de la tarea	Fecha de Inicio	Fecha final	Durac...
1	REDACCIÓ INTRODUCCIÓ	19/09/16	21/09/16	3d
2	RECERCA	21/09/16	07/10/16	13d
3	Història dels foils i del Nacra 17	21/09/16	23/09/16	3d
4	Paràmetres i requeriments dels foils	26/09/16	27/09/16	2d
5	Principis i fenòmens físics	02/10/16	07/10/16	6d
6	APLICACIÓ DE LA RECERCA	06/11/16	02/12/16	21d
7	Recerca de perfils	06/11/16	14/11/16	7d
8	Comparativa dels perfils	20/11/16	23/11/16	4d
9	Decisió final	27/11/16	02/12/16	6d
10	SIMULACIÓ	18/12/16	19/04/17	89d
11	Familiarització amb el Fluent	18/12/16	23/12/16	6d
12	Anàlisi de les solucions en 2D	19/02/17	28/02/17	8d
13	Interpretació de les solucions 2D	05/03/17	10/03/17	6d
14	REDACCIÓ PRESSUPOST	12/03/17	12/03/17	1d
15	REDACCIÓ IMPACTE AMBIENTAL	19/03/17	19/03/17	1d
16	REDACCIÓ CONCLUSIONS	19/04/17	19/04/17	1d

[Figura 6.1] Taula de feines i organització del treball.





[Figura 6.2] Diagrama de Gantt.

7. IMPACTE MEDIAMBIENTAL

Tot el treball s'ha simulat tenint en consideració que el material emprat per realitzar aquest *hydrofoil* sigui fibra de carboni. Aquest tipus de material s'empra continuament en el món de la navegació, tant en grans embarcacions com en vaixells de vela lleugera com és el cas del Nacra. Aquest composite té característiques mecàniques i químiques molt òptimes per les condicions de treball requerides. A continuació es mostra un petit estudi amb el programa CES EDUPACK que informa sobre quina és la despesa energètica generada per adquirir l'*hydrofoil* en els processos de l'obtenció del material i el seu manufacturat. Per altra banda també s'ha calculat la quantitat de CO_2 produïda en els diferents processos.

Per a calcular la quantitat d'energia necessària per a l'obtenció del material per als hydrofoils de les pales del timó s'ha considerat una corda de 0,18m, un gruix màxim de 0,03m i una longitud en l'eix z de 0,6m. Aquestes dades han donat lloc a un volum de 2160 cm^3 per foil. Considerant una densitat del material en qüestió de $1,6 \text{ g/cm}^3$ resulta un pes de 3,5 kg per cada foil. La primera taula reflecteix aquestes xifres i l'energia que cal per obtenir el material

Material:

[Energy and CO2 Summary](#)

Component	Material	Recycled content* (%)	Part mass (kg)	Qty.	Total mass processed** (kg)	Energy (MJ)	%
Hydrofoil	Epoxy SMC (carbon fiber)	Virgin (0%)	3.5	2	8	2.95e+03	100.0

[Figura 7.1] Taula de la despesa energètica per l'obtenció del material.

En aquest procés d'examinar quins són els diferents residus obtinguts del procés de manufacturat s'han estimat uns residus excedents del 12.5%, com es pot observar en la taula de continuació. Aquests residus es componen bàsicament de resina d'epoxi curada amb fibres de carboni.

Manufacture:

[Energy and CO2 Summary](#)

Component	Process	% Removed	Amount processed	Energy (MJ)	%
Hydrofoil	Compression molding	-	8 kg	2.71e+01	98.1
Hydrofoil	Cutting and trimming	12.5	1 kg	3e-01	1.1

[Figura 7.2] Taula de la despesa energètica pel manufacturat.

L'última taula conté la informació de la quantitat de CO_2 que es generaria per a fabricar una parella de foils per al Nacra 17.

Phase	Energy (MJ)	Energy (%)	CO2 (kg)	CO2 (%)
Material	2.95e+03	99.1	1.93e+02	98.9
Manufacture	2.73e+01	0.9	2.19	1.1

[Figura 7.3] Taula de la despesa energètica total.

CONCLUSIONS

Un cop acabat aquest treball estic satisfeta amb els resultats obtinguts ja que s'han aconseguit la gran majoria dels objectius que es pretenien assolir al començament.

Els dos primers, que tractaven d'entendre com funciona un *hydrofoil* i veure la seva evolució fins a l'actualitat, han resultat ser molt interessants i més fàcils del que semblaven a l'inici. Això ha estat gràcies, tant als coneixements adquirits amb l'assignatura de Mecànica de Fluids, com al que m'ha aportat el món de la vela al llarg de la meua vida.

El tercer que parlava de trobar un perfil que fós òptim per a una classe olímpica que està en plena fase de desenvolupament, és el que ha requerit més investigació personal. S'ha observat que hi ha perfils molt diferents i que és imprescindible saber exactament quins són els requisits a complir.

En la part de la simulació, que ha estat sens dubte la que ha exigut més hores, ja que cal conèixer bé el software utilitzat per fer un bon estudi del perfil, s'ha vist que el perfil seleccionat és adient pel Nacra 17. Amb aquest apartat s'assolia el quart objectiu tot i que hagués quedat més complert si s'hagués realitzat també un estudi en tres dimensions del perfil, el qual no s'ha fet per falta de temps.

Per últim s'ha calculat, tant el preu que tindria aquest projecte a la vida real, com l'impacte mediambiental que produiria la fabricació dels *hydrofoils*. Personalment m'ha sorprès veure el que costaria en termes de diners realitzar aquest projecte, però tenint en compte les hores dedicades i la feina feta, són xifres que quadren.



AGRAÏMENTS

M'agradaria començar per donar-li les gràcies a l'Enric Trillas, qui des del començament ha guiat el meu Treball de Fi de Grau i m'ha donat moltes idees que m'han estat de gran inspiració. També m'agradaria agrair-li la paciència i la dedicació que ha tingut per seguir ajudant-me tot i no estar a Barcelona durant aquest semestre.

En segon lloc m'agradaria esmentar a tots els meus entrenadors i amics que segueixen actius en el món de la vela i que m'han resolt dubtes tècnics quan ho he necessitat.

Per últim, moltes gràcies a la meva família i amics que m'han mostrat el seu suport durant el Grau en els bons i els mals moments.



BIBLIOGRAFIA

4.1.1

- <http://www.histarmar.com.ar/InfGral/Hidroalasbase.htm>
- <http://lancet.mit.edu/decavitator/Basics.html>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidroala>
- http://www.escuelamaritima.com/ver_noticia.php?iN=4041&pag=214&keys=&id_tipo=&id_subtipo=
- https://es.wikipedia.org/wiki/Nacra_17
- http://nauta360.expansion.com/2013/04/04/de_regata_en_regata/1365097226.html

4.2

- <http://www.nacra17class.com>

4.3

- https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar

4.4

- <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV13.html>
- <http://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capalimite-sustentacion-arrastre/teoria-capalimite-sustentacion-arrastre2.shtml>
- <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/bloque-aerodinamica-f1-in-schools/bloque-aerodinamica-f1-in-schools.shtml#momentodea>
- <http://www.histarmar.com.ar/nomenclatura/TeoriadelBuque.htm>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Cavitaci3n>

4.5

- <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema11/tema11-7.htm>
- <http://airfoiltools.com>
- <https://es.scribd.com/doc/94148509/Densidad-del-agua-entre-0-y-100-C>

5

- <https://cosmemarcano.files.wordpress.com/2007/08/corollaenfluent.pdf>
- <https://www.youtube.com/watch?v=rhXzH06ffWo&index=2&list=PLs11XxdVZrShIOBmO3wWIXNEu42CwV3bF>
- <https://www.youtube.com/watch?v=gB05xw8Q8YE&index=3&list=PLs11XxdVZrShIOBmO3wWIXNEu42CwV3bF>
- <https://www.youtube.com/watch?v=DsNjYAFxBZY&index=1&list=PLs11XxdVZrShIOBmO3wWIXNEu42CwV3bF>

5.1.3

- <http://www.tiposde.org/ciencias-naturales/357-tipos-de-presion/>

5.2

- <https://www.ocu.org/alimentacion/agua/informe/el-precio-del-agua>

